

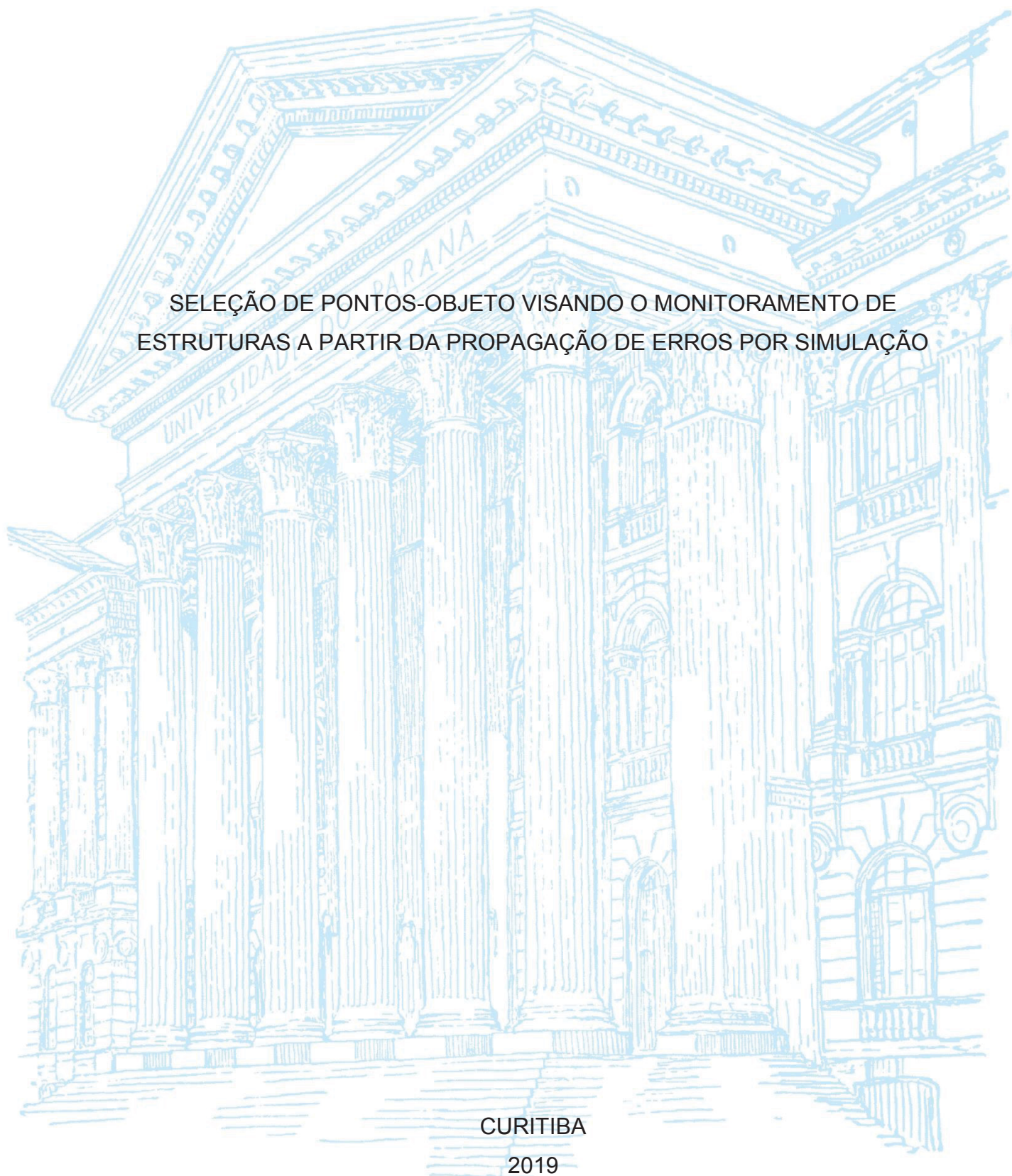
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LÍVIA FARIA SAMPAIO

SELEÇÃO DE PONTOS-OBJETO VISANDO O MONITORAMENTO DE
ESTRUTURAS A PARTIR DA PROPAGAÇÃO DE ERROS POR SIMULAÇÃO

CURITIBA

2019



LÍVIA FARIA SAMPAIO

SELEÇÃO DE PONTOS-OBJETO VISANDO O MONITORAMENTO DE
ESTRUTURAS A PARTIR DA PROPAGAÇÃO DE ERROS POR SIMULAÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Regiane Dalazoana

Coorientador: Prof. Dr. Luis Augusto Koenig Veiga

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S192s Sampaio, Livia Faria
Seleção de pontos-objeto visando o monitoramento de estruturas a partir da propagação de erros por simulação [Recurso eletrônico] / Livia Faria Sampaio – Curitiba, 2019.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas.

Orientadora: Regiane Dalazoana

Coorientador: Luis Augusto Koenig Veiga

1. Monitoramento estruturas (barragens). 2. Irradiação Tridimensional. 3. Lei de Propagação das Covariâncias. I. Universidade Federal do Paraná. II. Dalazoana, Regiane III. Veiga, Luis Augusto Koenig. IV. Título.

CDD: 526.36

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS
GEODÉSICAS - 40001016002P6

TERMO DE APROVAÇÃO

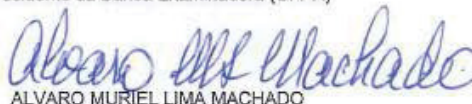
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS GEODÉSICAS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de LÍVIA FARIA SAMPAIO intitulada: **SELEÇÃO DE PONTOS-OBJETO VISANDO O MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS A PARTIR DA PROPAGAÇÃO DE ERROS POR SIMULAÇÃO**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 14 de Fevereiro de 2019.


REGIANE DALAZOANA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


ALVARO MURIEL LIMA MACHADO

Avaliador Interno (UFPR)


IVANDRO KLEIN

Avaliador Interno ()



ÉRICA SANTOS MATOS

Avaliador Externo (UFPR)

Dedico este trabalho a Deus e a minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, e pela força para eu conseguir atingir meus objetivos.

À UFPR e ao corpo docente do curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, em especial aos Professores Doutores Regiane Dalazoana e Luis Veiga, que não mediram esforços para me orientar e auxiliar ao longo do mestrado.

Aos Professores Dr. Álvaro Muriel Lima Machado e Dr.^a Silvana Philippi Camboim, pela ajuda na etapa de programação do trabalho.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoa do Ensino Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

Aos meus pais, Raquel e Martoni que sempre me apoiaram e me incentivaram ao longo dessa trajetória.

Ao meu marido, companheiro e melhor amigo Rodrigo, por estar aqui todos os dias me acompanhando, e me ajudando, inclusive na correção deste trabalho.

Aos meus sogros, Eliane e Floriano, e à minha cunhada Rafaela, que também sempre me incentivaram e apoiaram.

Aos meus familiares, irmãos (Luísa, Vitor, Pedro e Gabriel), avós (Margarida, Edno e Laisy), tios e primos que sempre estiveram presentes na minha vida.

Em especial, agradeço ao meu avô Antônio, que este ano deixou de estar presente fisicamente em minha vida, e passou a ser mais um anjo olhando por mim.

Aos meus amigos, os que já tinha, e os que conheci por causa do programa de Pós-graduação, e que de alguma maneira contribuíram para a realização desta dissertação.

“Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina. ”
(Cora Coralina)

RESUMO

O presente trabalho refere-se à aplicação de procedimentos metodológicos para o cálculo e representação de erros propagados em modelos de estruturas a serem monitoradas. Trabalhos que envolvem levantamentos de campo visando o monitoramento de estruturas apresentam erros devido à instrumentação utilizada e à geometria da rede de monitoramento, esta última em função da localização da estação em relação aos pontos que serão monitorados (pontos-objeto). Neste contexto, decidiu-se realizar simulações visando prever como ocorre o comportamento desses erros propagados no levantamento, considerando a utilização do método de estação livre para orientação da estação total e do método de irradiação tridimensional para o monitoramento. Na primeira parte do levantamento, em que se orienta a estação a partir de três pontos conhecidos, calcularam-se as coordenadas do equipamento de medida através do método da estação livre empregando-se o ajustamento pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) – modelo paramétrico - e a partir da precisão das coordenadas do ponto da estação livre, da precisão nominal do equipamento utilizado, e do modelo matemático do método de irradiação tridimensional, calculou-se a precisão dos pontos a serem monitorados a partir da lei de propagação das covariâncias. Com essa metodologia empregada foram realizadas simulações em uma área de estudo possível de ser monitorada, onde foram consideradas diferentes posições para implantação dos pontos de apoio para orientação da estação total, e diferentes posições para a estação total utilizada no levantamento. Os resultados da pesquisa evidenciaram que um dos fatores que mais influenciam nos erros propagados para os pontos-objeto são as distâncias entre estes e a estação. Também foi possível observar e quantificar o quanto a geometria referente à posição da estação total influencia nos erros que supostamente serão obtidos em um levantamento visando o monitoramento de estruturas. Por fim os resultados dos erros propagados obtidos foram representados tridimensionalmente na estrutura avaliada para que fosse possível um resultado visual mais intuitivo dos erros calculados.

Palavras-chave: Monitoramento de estruturas 1. Irradiação Tridimensional 2. Estação Livre 3. Lei de Propagação das Covariâncias 4. Simulações 5.

ABSTRACT

This work refers to the application of methodological procedures for the calculation and representation of error propagation in the model of the structures to be monitored. The surveys activities with the goal of monitoring structures present errors due to the instrumentation and the geometrical configuration of the monitoring network, the last one depending on the location of the total station in relation to the points that will be monitored (object-points). In this context, it was decided to perform simulations to predict how the behavior of these propagated errors occurs in the survey, considering the use of the free station method for total station orientation and the three-dimensional irradiation method for monitoring. In the first part of the survey, in which the station is oriented from three known points, the coordinates of the measurement equipment were calculated through the free station method using the Method of Least Squares – Parametric Method. And using the accuracy of the coordinates of the free station point, the nominal accuracy of the equipment used, and the mathematical model of the three-dimensional irradiation method, the accuracy of the points to be monitored was calculated with the law of propagation of covariances. With this methodology, simulations were performed in a study area that could be monitored, where different positions were considered for implementation of the support points for orientation of the total station, and different positions for the total station used in the survey. The results of the research showed that one of the factors that most influence the errors propagated to the object-points are the distances between them and the total station. It was also possible to observe and quantify how the geometry of the position of the total station influences the errors that supposedly will be obtained in a survey aiming the monitoring of structures. Finally, the results of the obtained propagated errors were represented in a three-dimensional form in the structure, making possible a more intuitive visual effect for the calculated errors.

Keywords: Monitoring structures 1. Three-dimensional irradiation 2. Free Station 3. Law of Propagation of Covariances 4. Simulations 5.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REDES DE MONITORAMENTO	27
FIGURA 2 – CONCEITO: PROPAGAÇÃO DE ERRO	29
FIGURA 3 - ELIPSE DE ERRO	35
FIGURA 5 - MÉTODO DE ESTAÇÃO LIVRE.....	38
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO DE IRRADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL.....	42
FIGURA 6 - USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ	45
FIGURA 7 – MODELO 3D DA UHE DE MAUÁ.....	46
FIGURA 8 – NUVEM DE PONTOS.....	46
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA.....	47
FIGURA 10 - CENÁRIO 1	55
FIGURA 11 - CENÁRIO 2	56
FIGURA 12 - CENÁRIO 3	57
FIGURA 13 - CENÁRIO 4	58
FIGURA 14 - PRIMEIRA JANELA DO <i>PLUGIN</i> PROPAGACAO_ERRO	59
FIGURA 15 - SEGUNDA JANELA DO <i>PLUGIN</i> PROPAGACAO_ERRO	60
FIGURA 16 - TERCEIRA JANELA DO <i>PLUGIN</i> PROPAGACAO_ERRO.....	60
FIGURA 17 - EXEMPLO DA TABELA DE ATRIBUTOS DO ARQUIVO <i>SHAPEFILE</i> QUE DEVE SER INSERIDO NO <i>PLUGIN</i>	61
FIGURA 18 - TABELA DE ATRIBUTOS DO ARQUIVO DE SAÍDA PARA OS PONTOS-OBJETO CALCULADOS PELO <i>PLUGIN</i>	61
FIGURA 19 - ESTAÇÃO ORIENTADA NOS PONTOS C1, C2, C3, C4 E C5.....	64
FIGURA 20 - POSIÇÕES DE INSTALAÇÃO DA ESTAÇÃO TOTAL.....	65
FIGURA 21 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS A PARTIR DA ESTAÇÃO 01.....	67
FIGURA 22 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS A PARTIR DA ESTAÇÃO 02.....	69
FIGURA 23 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS A PARTIR DA ESTAÇÃO 03.....	70
FIGURA 24 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS A PARTIR DA ESTAÇÃO 01 PARA O CENÁRIO 4	72
FIGURA 25 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES VALORES DOS DESVIOS- PADRÃO DOS CENÁRIOS AVALIADOS	75
FIGURA 26 - ELIPSES DE ERRO - CENÁRIO 1	76
FIGURA 27 - ELIPSES DE ERRO - CENÁRIO 2	77

FIGURA 28 - ELIPSES DE ERRO - CENÁRIO 3	78
FIGURA 29 - COMPARAÇÃO ENTRE AS ELIPSES DE ERRO DOS DIFERENTES CENÁRIOS	80

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS PARA AS COORDENADAS DAS ESTAÇÕES.....	63
GRÁFICO 2 - DESVIOS-PADRÃO DA ESTAÇÃO 4 ORIENTADA NOS PONTOS A, B, C1, C2, C3, C4 E C5	64
GRÁFICO 3 – DP3D CÁLCULADOS PARA 1,3 E 8 SÉRIES DE LEITURAS - CENÁRIO 1.....	66
GRÁFICO 4 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS PARA O CENÁRIO 1.....	67
GRÁFICO 5 – DP3D CALCULADOS PARA 1, 3 E 8 SÉRIES DE LEITURAS - CENÁRIO 2.....	68
GRÁFICO 6 - DESVIOS-PADRÃO CÁLCULADOS PARA O CENÁRIO 2.....	69
GRÁFICO 7 – DP3D CALCULADOS PARA 1, 3 E 8 SÉRIES DE LEITURAS - CENÁRIO 3.....	70
GRÁFICO 8 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS PARA O CENÁRIO 3 COM UMA SÉRIE DE LEITURAS.....	71
GRÁFICO 9 - CENÁRIO 4, COM UMA SÉRIE DE LEITURAS E A ESTAÇÃO ORIENTADA NOS PONTOS C1, C2, C3, C4 E C5	72
GRÁFICO 10 - CENÁRIO 4, 1 SÉRIE DE LEITURAS, ESTAÇÃO ORIENTADA NO PONTO C5.....	73
GRÁFICO 11 - COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS 1, 2 E 3.....	74
GRÁFICO 12 - COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS 1, 2, 3 E 4.....	74

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COORDENADAS EM UM SISTEMA DE REFERÊNCIA LOCAL DOS PONTOS DA ESTAÇÃO LIVRE E DOS PONTOS DE APOIO DO CENÁRIO 1.....	56
TABELA 2 – COORDENADAS EM UM SISTEMA DE REFERÊNCIA LOCAL DOS PONTOS DA ESTAÇÃO LIVRE E DOS PONTOS DE APOIO DO CENÁRIO 2.....	56
TABELA 3 – COORDENADAS EM UM SISTEMA DE REFERÊNCIA LOCAL DOS PONTOS DA ESTAÇÃO LIVRE E DOS PONTOS DE APOIO DO CENÁRIO 3.....	57
TABELA 4 – COORDENADAS EM UM SISTEMA DE REFERÊNCIA LOCAL DOS PONTOS DA ESTAÇÃO LIVRE E DOS PONTOS DE APOIO DO CENÁRIO 4.....	58
TABELA 5 - VALORES DOS DESVIOS-PADRÃO ESTIMADOS PARA AS ESTAÇÕES.....	62
TABELA 6 - PARÂMETROS DAS ELIPSES DE ERRO CALCULADOS PARA O CENÁRIO 1.....	77
TABELA 7 - PARÂMETROS DAS ELIPSES DE ERRO CALCULADOS PARA O CENÁRIO 2.....	78
TABELA 8 - PARÂMETROS DAS ELIPSES DE ERRO CALCULADOS PARA O CENÁRIO 3.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

dp3d	- Resultante tridimensional do erro calculado nas componentes X,Y e Z
dp2d	- Resultante bidimensional do erro calculado nas componentes X e Y
dpx	- Desvio-padrão calculado para a componente X
dpy	- Desvio-padrão calculado para a componente Y
dpz	- Desvio-padrão calculado para a componente Z
EL	- Estação Livre
ET	- Estação Total
GNSS	- Global Navigation Satellite System
ppm	- Parte por milhão
PPGCG	- Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas
MMQ	- Método dos Mínimos Quadrados
MVC	- Matriz Variância-Covariância
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
UHE	- Usina Hidrelétrica de Energia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA	20
1.2 OBJETIVOS	22
1.2.1 Objetivo geral	22
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
2 REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1 TEORIA DOS ERROS.....	24
2.2 PRÉ-ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO	25
2.2.1 Redes geodésicas de monitoramento	26
2.2.2 Propagação de erro e Lei de Propagação das Covariâncias	28
2.2.3 Elipses de erro	34
2.3 MÉTODO DE ESTAÇÃO LIVRE	36
2.4 IRRADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL.....	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 MATERIAIS	44
3.2 ESTUDO DE CASO	45
3.3 DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO GEOESPACIAL UTILIZANDO <i>PYTHON</i> 47	
3.3.1 Orientação da estação total pelo método de estação livre	50
3.3.2 Aplicação da Lei de Propagação das Covariâncias para o modelo matemático do método de irradiação tridimensional.....	50
3.4 VISUALIZAÇÃO DOS DADOS.....	54
3.5 CENÁRIOS DOS TESTES APLICADOS.....	55
4 RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS	59
4.1 <i>PLUGIN</i> PROPAGAÇÃO_ERRO	59
4.2 AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DOS PONTOS OCUPADOS PELA ESTAÇÃO TOTAL NOS DIFERENTES CENÁRIOS.....	62
4.3 AVALIAÇÃO DA PRECISÃO CALCULADA PARA OS PONTOS-OBJETO A PARTIR DAS DIFERENTES POSIÇÕES DA ESTAÇÃO	65
4.3.1 Testes aplicados para o cenário 1.....	66
4.3.2 Testes aplicados para o cenário 2.....	68
4.3.3 Testes aplicados para o cenário 3.....	69

4.3.4 Testes aplicados para o cenário 4.....	71
4.3.5 Comparação entre os diferentes cenários.....	73
4.3.6 Representação das elipses de erro	76
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	81
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

Atualmente as técnicas de levantamentos geodésicos são utilizadas largamente no âmbito de monitoramento de estruturas. A execução de levantamentos de campo com esse objetivo, normalmente passa pelas etapas de: planejamento; execução; realização de cálculos (ajustamento) e divulgação dos resultados e sua qualidade (KUANG, 1996). Na etapa de planejamento, também conhecida como pré-análise, é necessário que seja realizado um estudo prévio da área de estudos, e que sejam definidos alguns requisitos para a atividade de levantamento, como por exemplo, definir a precisão a ser alcançada, o instrumental a ser utilizado, as observações a serem realizadas, a geometria do problema a ser resolvido, o custo total do levantamento, a confiabilidade e o controle dos erros.

Os levantamentos de campo visando o monitoramento de um objeto ou estrutura normalmente implicam em determinar uma grandeza que esteja correlacionada ao mesmo, como um comprimento ou coordenada de um ponto deste objeto. Isto é feito através de medições diretas ou indiretas. Em ambas as situações, caso estas medições estejam eivadas de erro (e teoricamente toda observação apresenta erros), estes de alguma maneira irão afetar as grandezas desejadas/determinadas, uma vez que serão propagados para as mesmas. O estudo disto é chamado de propagação de erros. Mas é importante lembrar que, quando se trabalha com a propagação, assume-se que não existem erros sistemáticos na amostra e apenas erros aleatórios estão presentes (GHILANI, 2017).

Para a realização de atividades de monitoramento, são implantadas redes de monitoramento, que são compostas por um conjunto de pontos de controle (rede de referencia) e de pontos-objeto (pontos monitorados). Em geral, em trabalhos de otimização de redes, como por exemplo os trabalhos realizados por Klein (2014), Marini e Monico (2003), Suci e Faggion (2012), são consideradas como redes geodésicas somente a distribuição espacial dos pontos de controle a partir dos quais os monitoramentos serão realizados. Ainda mais tradicionalmente, as técnicas de mensuração envolviam redes geodésicas onde os pontos-objeto faziam parte desta rede e eram considerados fixos no processo de otimização, pois estão definidos na estrutura. Isto ocorria em função de técnicas como triangulação e trilateração. Atualmente, utiliza-se a medição dos pontos-objeto por técnicas como a irradiação 3D,

e um exemplo disto é o monitoramento da barragem da Usina Hidrelétrica de Mauá (UHE) realizado por Siguel (2013).

O método que tem sido muito empregado para a orientação da estação total em um trabalho de levantamento é o método de estação livre (EL), também conhecido na literatura como método de ressecção, ou interseção à ré. Este método é considerado um dos mais modernos para monitoramentos geodésicos, e vem sendo utilizado em monitoramento para a detecção de deslocamentos de estruturas (SHULTS e ROSHCHYN, 2016). Ramos, Rodrigues e Andrade (2007), avaliaram a precisão de posicionamentos utilizando o método de EL, para isto empregaram a fórmula de Tienstra e o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) e avaliaram os cálculos em função de posições (e precisões) fictícias pré-estabelecidas simulando a realidade quanto à configuração geométrica dos pontos visados.

Ao realizar um levantamento com estação total, um profissional não necessariamente ocupa um ponto de uma rede de referência pré-estabelecida, neste caso, pode-se então realizar visadas a dois ou mais pontos pré-estabelecidos e empregar o método de estação livre para determinar as coordenadas do ponto ocupado. Este método, como o termo sugere, permite ao profissional escolher o melhor local para posicionar a estação total e determinar a sua distância e direção em relação a dois ou mais pontos (KLEIN et al. 2017). Esta característica de posicionamento da estação, otimiza o trabalho de campo e acaba tornando ainda mais viável o uso deste método para levantamentos visando o monitoramento de estruturas.

Um dos problemas básicos para otimização de uma rede geodésica é definir onde serão posicionados os pontos que irão compor a rede de referência. Para se definir a configuração da rede de referência, existem duas abordagens que podem ser utilizadas: a) simulação computacional ou método de tentativa e erro; b) métodos analíticos, que tentam formular matematicamente o problema desejado em termos de equações ou desigualdades e, em seguida, resolver explicitamente a solução ideal (OGUNDARE, 2015). O método de tentativa e erro utiliza julgamentos pessoais em cada etapa e exige repetições até se encontrar uma solução de rede satisfatória (improvável de ser ótima).

Na simulação, o problema de propagação de erros tem como finalidade determinar a precisão das medidas que irá satisfazer um limite de tolerância específico para uma quantidade desconhecida a ser determinada. A simulação pode mostrar que

as exigências da precisão das medidas estão abaixo ou além da capacidade exigida. Se a exigência for abaixo desta capacidade, o cliente deve ser informado que o limite de tolerância especificado pode não ser satisfatório (OGUNDARE, 2015).

No âmbito dos levantamentos geodésicos alguns métodos são utilizados para o monitoramento de estruturas, entre eles estão o nivelamento geométrico de primeira ordem, levantamento gravimétrico, posicionamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e irradiação tridimensional. Cada um desses métodos para levantamentos utiliza equipamentos, técnicas e procedimentos de campo distintos. Logo, para cada tipo de levantamento a modelagem do problema para determinação dos erros propagados será diferente. A partir do modelo matemático utilizado para cada um desses métodos, pode-se aplicar a lei de propagação das covariâncias para determinação dos erros propagados nesse levantamento.

No ajustamento de observações, a precisão das coordenadas pode ser determinada a partir da aplicação da propagação de erros às equações de observação. É essencial determinar a precisão do posicionamento e, sem conhecimento adequado do provável erro em coordenada, a pesquisa deve ser considerada incompleta (DEPARTMENT OF THE ARMY, 1994). Os trabalhos de monitoramento realizados atualmente apresentam os valores das precisões calculadas para as observações realizadas, mas esses valores são utilizados normalmente apenas para mostrar a qualidade dos trabalhos executados.

O procedimento geral para monitoramento de deformações de uma estrutura envolve medidas espaciais de deslocamento de pontos-objeto determinados a partir de uma rede de referência externa de pontos que é considerada fixa em determinada posição. Tanto os métodos celestes como os terrestres são usados para medir estes deslocamentos espaciais. Quando os pontos de referência são colocados na estrutura ou em área sujeita a deformação, apenas deformações relativas são determinadas.

Deformações absolutas ou deslocamentos absolutos são possíveis de serem detectados se os pontos de referência estiverem localizados fora da área sob deformação. Posteriormente são realizadas observações periódicas desses pontos de referência. Avaliações de deformações permanentes dependem de dados absolutos, ou seja, de dados que foram obtidos a partir da medição desses pontos de referência localizados fora da área sob deformação (DEPARTMENT OF THE ARMY, 1994).

Como visto anteriormente, muitos estudos têm sido realizados no âmbito de otimização de redes geodésicas. No entanto, a maioria deles considera apenas a

configuração da rede de referência, a partir da qual as observações são feitas, e não se considera onde podem ser implantados os pontos-objeto da rede de monitoramento. As redes de referência geralmente já passaram por um processo de otimização para a sua configuração, e não necessariamente é preciso ocupar um desses pontos da rede para realizar um monitoramento, pode-se apenas utilizar esses pontos para orientação da estação e, posteriormente, executar o monitoramento dos pontos-objeto. Nesse contexto, formulou-se a seguinte questão como problema de pesquisa: Como determinar por meio de simulação computacional a posição de implantação de pontos-objeto para o monitoramento de estruturas de forma que a propagação de erros seja mínima (ou menor) para esses pontos?

Como hipótese de solução para este problema espera-se que: Se ao realizar atividades de levantamento visando o monitoramento de estruturas é necessário determinar onde serão implantados os pontos-objeto a serem monitorados, então se pode aplicar a lei de propagação das covariâncias para determinação do erro propagado pela instrumentação e pelo método utilizado para toda a estrutura, permitindo assim estimar a localização de onde os pontos-objeto podem ser implantados de forma a garantir os menores valores dos desvios-padrão para estes pontos, melhorando a qualidade do levantamento realizado.

1.1 JUSTIFICATIVA

Diante de um cenário de tragédias ocorridas no âmbito de rompimento de barragens, como a de Mariana (2015) e a de Brumadinho (2019), ambas em Minas Geras, reforça-se a importância de atividades ligadas ao monitoramento constante de estruturas. Todos os estudos relacionados ao monitoramento de estruturas a partir de métodos de levantamentos geodésicos, incluindo toda a etapa de planejamento, se mostram de suma importância para o acompanhamento temporal do empreendimento.

Quando se realiza um levantamento, existem diversos critérios que devem ser definidos na etapa de planejamento. Nesta etapa, é necessário definir os métodos de levantamento a serem adotados, os equipamentos que serão utilizados, a geometria para implantação de pontos de controle, a precisão que se deseja atingir com esse levantamento, entre outros.

No caso específico de um levantamento visando o monitoramento de estruturas, um método que vem sendo amplamente utilizado para a orientação da estação total é o método de estação livre, e para o monitoramento da estrutura, o método de irradiação tridimensional.

Para a realização do método de estação livre, pode-se definir previamente qual a localização de instalação da estação total, considerando como essa posição irá interferir na precisão das coordenadas da própria estação (devido a sua posição em relação aos pontos que serão utilizados para a orientação da mesma) e nos valores dos erros que serão propagados aos pontos na estrutura monitorada. Uma vantagem deste método é que não é necessário que a estação total ocupe um ponto da rede de referência, já que a estação pode ser posicionada em qualquer local desde que permita a visada e orientação a alguns pontos da rede. Isto facilita o levantamento de campo, uma vez que torna mais flexível a posição de instalação da estação.

Com isso, há inúmeras combinações de resultados que implicam diretamente na precisão dos pontos-objeto dependendo da orientação da estação. A realização deste trabalho visa tornar possível a simulação de testes prévios em relação ao planejamento de um levantamento, permitindo a escolha ótima - ou várias escolhas de possibilidades – de forma que se possa obter um resultado para os erros propagados dentro de determinado limite estabelecido.

Um dos diferenciais deste trabalho está no fato da utilização dos pontos de uma rede de referência apenas para orientação da estação empregando-se o método da estação livre.

Outro fator importante é que, em trabalhos que envolvem propagação de erros e pré-análise, geralmente são utilizadas apenas elipses de erro para representação dos erros. Aqui se propõe representar os erros na forma de escala de cores em um modelo da estrutura monitorada. Desse modo, ao visualizar a estrutura, já se sabe, dependendo do equipamento e da posição de instalação, qual o erro que se espera para determinada área da estrutura monitorada.

A realização deste trabalho facilita também a avaliação de deslocamentos encontrados no monitoramento. Por exemplo: se os valores dos deslocamentos encontrados para determinado ponto-objeto forem menores do que o erro esperado para aquele ponto, pode significar que talvez não houve de fato deslocamento uma vez que o erro propagado para o ponto é maior que a diferença entre as coordenadas,

necessitando assim de uma análise estatística mais detalhada para confirmar o efetivo deslocamento.

Apesar de ser possível determinar as áreas em que os pontos-objeto irão atingir os menores valores dos desvios-padrão para as suas coordenadas, é importante ressaltar que nem sempre essa área será a melhor para implantação dos pontos-objeto, uma vez que, quando se trata de monitoramento, deve-se considerar também que a própria estrutura/objeto a ser monitorada apresenta uma região mais propensa a deslocamentos que outras devido à finalidade da mesma. Em cada situação específica da estrutura a ser monitorada devem ser consideradas as limitações impostas pela localização para a implantação dos pontos-objeto. Podem existir situações nas quais a localização em que a estrutura se apresenta não permita a escolha desses pontos-objeto.

A realização de simulações permite verificar quais as possibilidades para um levantamento e, a partir daí, pode-se tomar as decisões que melhor se adequam ao problema proposto. A partir dessas decisões tomadas com base em simulações, é possível obter uma otimização dos trabalhos de levantamentos visando o monitoramento, de forma que seja atingida uma melhor qualidade e melhor custo-benefício.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Aplicar a lei de propagação das covariâncias para o apoio à seleção de pontos-objeto para o monitoramento de estruturas por meio de simulação computacional, visando determinar quais as possíveis soluções de configurações para um levantamento, as quais permitam atingir os menores valores dos erros propagados na estrutura avaliada.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar qual a melhor posição de implantação dos pontos de controle, que serão utilizados para orientar a estação total a partir do método de estação livre;

- Quantificar os erros propagados em uma estrutura a ser monitorada a partir do método de levantamento de irradiação tridimensional;
- Determinar a região de implantação de pontos-objeto na estrutura a ser monitorada;
- Analisar os resultados obtidos para os erros propagados nos pontos-objeto avaliados;
- Representar de forma visual os valores calculados dos erros propagados na estrutura monitorada.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, é apresentada uma revisão teórica sobre os principais temas envolvidos nesta Dissertação, sendo estes: Teoria dos erros; Pré-análise e otimização, com os subitens: Redes geodésicas de monitoramento; Propagação de erro e lei de propagação das covariâncias, e Elipses de erro; Método de Irradiação tridimensional; e Método de estação livre.

2.1 TEORIA DOS ERROS

A ciência e a engenharia envolvem diferentes tipos de medidas. Em Geodésia e Topografia, quantidades geométricas (como por exemplo: ângulos e distâncias) ou quantidades físicas (como a gravidade) são medidas ou observadas de forma direta ou indireta, gerando uma grande quantidade de dados que precisam ser processados e analisados. Devido a limitações humanas, imperfeição dos equipamentos, condições ambientais não favoráveis para medições, e rotinas impróprias de medidas, juntas essas condições resultam em observações com erros (FAN, 1997).

Pode-se descobrir a existência de erros de diferentes formas. A repetição da medição para uma mesma grandeza permite verificar a existência de observações que sejam discrepantes do conjunto observado. Outra maneira de descobrir possíveis erros é verificar se os resultados de medição satisfazem algumas relações geométricas ou físicas que possam existir. Por exemplo, pode-se verificar se a soma de três ângulos internos medidos de um triângulo plano é igual ao valor teórico de 180° .

Gemael, Machado e Wandresen (2015) classificam os erros em três tipos: erros grosseiros, erros sistemáticos, e erros acidentais. Os erros grosseiros normalmente ocorrem devido a falhas humanas, como a inversão de dígitos em uma leitura, ou devido a algum erro no manuseio do equipamento. Já os erros sistemáticos são produzidos por causas conhecidas e podem ser evitados a partir de técnicas especiais de observação ou eliminados a posteriori mediante fórmulas fornecidas pela teoria. Um exemplo é a correção do efeito de refração que pode ser aplicada a uma medida eletrônica de distância. O erro acidental ou aleatório, diferente dos demais erros, não pode ser vinculado a nenhuma causa conhecida. Esse tipo de erro tende a se neutralizar quando o número de observações cresce. Nos estudos e tarefas

relacionados ao ajustamento das observações, esses erros aleatórios é que serão tratados.

Um fator importante da teoria dos erros é a determinação da qualidade das observações que considera três aspectos: a precisão, a acurácia e a confiabilidade. A precisão descreve o grau de variação de resultados de uma medida/observação e é uma medida interna do erro aleatório e seus efeitos na qualidade da observação. Acurácia é a medida de concordância entre o valor observado e o valor correto. A confiabilidade se refere à capacidade da observação de identificar erros grosseiros e sistemáticos. Em geral, observações redundantes podem melhorar a precisão, a acurácia e a confiabilidade das observações, bem como dos resultados derivados (FAN, 1997).

2.2 PRÉ-ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO

A pré-análise consiste em um estudo prévio, em uma simulação de como os erros se propagam no levantamento, levando em conta o instrumental a ser utilizado, as observações a serem realizadas (tipo e quantidade) e a geometria do problema a ser resolvido (DALAZOANA, 2015). Sendo assim, considera-se que a pré-análise corresponde à etapa de planejamento das atividades de levantamentos (topográficos ou geodésicos) que serão realizadas em campo. Nesta etapa deve-se definir todos os pré-requisitos necessários a atender parâmetros de qualidade para uma rede geodésica ou para qualquer outra atividade de levantamento, como o monitoramento de estruturas civis, por exemplo.

Logo, pode-se dizer que a etapa de planejamento serve de ferramenta para a otimização, que é a procura por uma solução ideal. A otimização consiste em um conjunto de procedimentos que conduzam a uma solução ótima, no sentido de ideal, dentro de determinados critérios (SANTOS, 1999). As determinações desses critérios devem convergir de forma a garantir que a qualidade final dos resultados, determinada na etapa de pré-análise seja atingida.

No planejamento de um projeto para a execução de um levantamento, a pré-análise serve para verificar como se dá a propagação de erros com base no que foi projetado, antes mesmo da coleta das observações em campo, possibilitando verificar se as necessidades em termos de qualidade serão atingidas. Aspectos importantes a serem considerados na pré-análise são: (a) as possíveis técnicas de levantamento e

o modelo matemático relacionado; (b) os equipamentos disponíveis para o levantamento (DALAZOANA, 2015).

Nessa etapa é requerido o conhecimento a priori da precisão das observações, de modo que se possa inferir o quanto as observações, e consequentemente os resultados finais, serão afetados por condições instrumentais e de ambiente. Uma análise posterior possibilita que informações confiáveis sobre as variâncias e covariâncias, de todas as observações coletadas no levantamento, sejam usadas para a estimativa dos parâmetros de interesse, bem como na avaliação da qualidade do resultado final (SANTOS, 1999).

Dependendo das possibilidades disponíveis para a seleção desses critérios observacionais, realizam-se simulações gerando possíveis soluções para o problema. A melhor solução, ou seja, a solução ótima, deve ser escolhida levando em consideração o ponto de vista técnico e econômico.

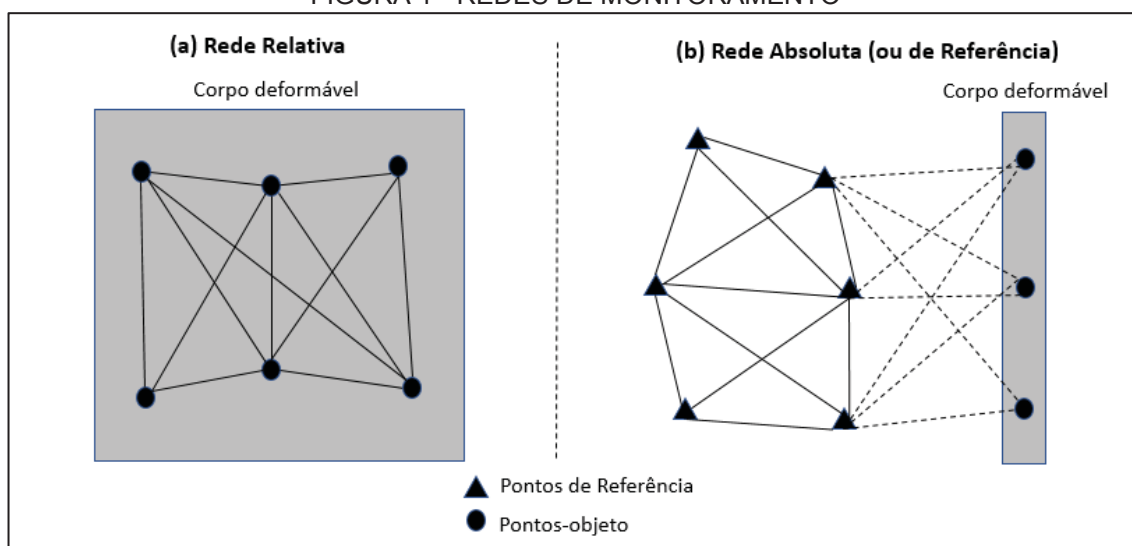
A pré-análise é importante nas atividades de monitoramento de estruturas, pois, além de otimizar os trabalhos de campo, auxilia na determinação dos erros propagados no levantamento em função da técnica e do equipamento utilizado. Como as medidas no monitoramento são geralmente milimétricas, é necessário distinguir dentro dos valores encontrados para precisão das coordenadas monitoradas o que realmente representa deformação ou deslocamento da estrutura e o que é apenas erro propagado devido à instrumentação e metodologia utilizada.

2.2.1 Redes geodésicas de monitoramento

As redes geodésicas consistem em um conjunto de pontos materializados no terreno cujas coordenadas são determinadas em relação a um referencial bem definido e estimadas por meio de observações terrestres ou, em um contexto mais moderno, observações espaciais. As redes geodésicas apresentam várias aplicações dentro do contexto da engenharia, entre elas: realização de um sistema de referência para o usuário; apoio para o mapeamento e navegação; fornecem pontos de apoio para a realização de monitoramentos; entre outros. Para aplicação de uma rede visando o monitoramento de estruturas é necessário um levantamento de campo para implantação dos pontos que irão compor a rede geodésica, devendo levar em consideração a posição dos pontos de referência e dos pontos-objeto a serem medidos.

Sob o ponto de vista do monitoramento, Chrzanowski (1981) distingue dois tipos de redes, apresentadas na FIGURA 1: (a) redes relativas, nas quais os pontos que compõem a rede estão situados na região sob deformação, que pode ser modelada através de medições repetidas ao longo do tempo; e (b) redes de referência, nas quais alguns dos pontos se situam fora da região sob deformação, permitindo a determinação dos deslocamentos absolutos dos pontos na área deformável.

FIGURA 1 - REDES DE MONITORAMENTO



FONTE: ADAPTADO DE SANTOS (1999)

Segundo Grafarend (1974) o projeto ou otimização de redes geodésicas é dividido em ordens: Projeto de Ordem Zero; Projeto de Primeira Ordem; Projeto de Segunda Ordem e Projeto de Terceira Ordem. O projeto de ordem zero está ligado à escolha de um sistema de referência. O projeto de primeira ordem se refere à geometria da rede, que depende da topografia local e da forma da estrutura a ser monitorada. No projeto de segunda ordem deve ser feita a escolha dos procedimentos de observação e de medição, ou seja, a escolha da técnica de levantamento a ser utilizada. Por fim, o projeto de terceira ordem engloba melhorar uma rede pré-existente. Também pode-se considerar os projetos combinados, que consistem em otimizar, simultaneamente, os projetos de primeira ordem e de segunda ordem (VANÍCEK e KRAKIWSKY, 1986).

Adicionalmente à definição do projeto de redes geodésicas, Kuang (1996) também define algumas especificações para o projeto de redes de monitoramento, são elas:

1. Não existe projeto de ordem zero nas redes de monitoramento. No caso das redes de referência, os deslocamentos são determinados a partir da comparação entre coordenadas determinadas em épocas distintas, com respeito ao mesmo *datum*, definido na época inicial, e cujo movimento nas épocas subsequentes deve ser identificado.

2. Com respeito ao projeto de primeira ordem, a forma da rede de monitoramento depende da topografia do local ou da forma da estrutura a ser monitorada. Contudo, sempre é possível que alguns dos pontos que compõem a rede possam ter suas localizações alteradas, melhorando a configuração da rede, seguindo algum critério de otimização. Nas redes de referência, pontos de controle devem se situar fora da área sob deformação, ao passo que os pontos-objeto de estudo devem estar distribuídos dentro da área sujeita à deformação.

3. O problema relacionado ao projeto de segunda ordem para as redes de monitoramento consiste em encontrar as precisões das observáveis, isto é, da matriz peso, que conduzam à determinação dos parâmetros o mais perto possível do ideal para o propósito do monitoramento. A solução do projeto de segunda ordem possibilita a escolha dos procedimentos de medição e observação.

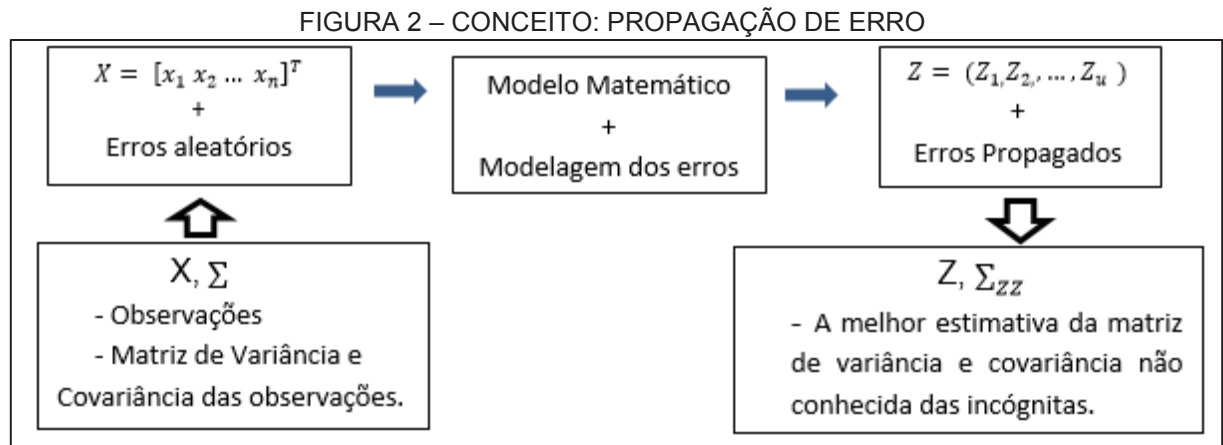
4. A questão do projeto de terceira ordem está ligada à melhoria de uma rede de monitoramento existente. Pode existir, por exemplo, quando as precisões associadas aos deslocamentos ou parâmetros de deformação não sejam satisfatórias, ou quando a análise das deformações mostrar uma tendência incompatível com a realidade. Nestes casos, a rede de monitoramento deve ser estendida por pontos ou observações adicionais.

2.2.2 Propagação de erro e Lei de Propagação das Covariâncias

Valores desconhecidos de grandezas são geralmente determinados indiretamente pela realização de medidas diretas de outras quantidades, que são relacionadas funcionalmente à quantidade calculada desconhecida. Um exemplo dessas quantidades que são determinadas indiretamente por realização de medidas diretas é a obtenção das coordenadas de uma estação a partir de observações de direções e distâncias. Uma vez que todo tipo de observação direta contém erros, qualquer valor obtido a partir desses valores diretos (como as coordenadas de um ponto obtidas a partir da medida de direções e distâncias) também irão conter erros.

Essa intrusão ou propagação dos erros, que ocorre nas quantidades calculadas a partir de medidas diretas, é chamada de propagação de erro (GHILANI, 2017).

Segundo El-Sheimy (2000), a propagação de erros é o processo de avaliação dos erros nas quantidades estimadas (Z) como função dos erros nas medidas ou observações (X). A FIGURA 2 ilustra este conceito:



FONTE: ADAPTADO DE EL-SHEIMY (2000)

Em geral são fornecidas as observações e suas respectivas variâncias (ou o próprio valor do desvio-padrão), permitindo assim a montagem da matriz de variância e covariância das observações. E é requerida/calculada a matriz de variância e covariância das incógnitas (Σ_{zz}). O número de incógnitas é normalmente representado pela letra u , e o número de observações é representado pela letra n . O número de graus de liberdade é representado pela letra r , e pode ser calculado considerando o número de observações (n) menos o número de incógnitas (u).

Para o cálculo de propagação de erros, assume-se que todos os erros sistemáticos são eliminados, então apenas os erros aleatórios são considerados nas observações diretas. Para se chegar na equação básica de propagação de erro, considera-se a seguinte função: $z = a_1x_1 + a_2x_2$, onde x_1 e x_2 são duas quantidades observadas independentes. Analisando como os erros se propagam nessa função, pode-se desenvolver uma expressão geral para a propagação de erros em qualquer função (GHILANI, 2017).

Uma vez que x_1 e x_2 são duas quantidades observadas independentes, cada uma delas tem diferentes funções de densidade de probabilidade. Considera-se que os erros em n determinações de x_1 sejam $\varepsilon_1^i, \varepsilon_1^{ii}, \dots, \varepsilon_1^n$, e os erros em n determinações de x_2 sejam $\varepsilon_2^i, \varepsilon_2^{ii}, \dots, \varepsilon_2^n$, dessa forma, tem-se que (GHILANI, 2017):

$$z_T = \left\{ \begin{array}{l} a_1(x_1^i - \varepsilon_1^i) + a_2(x_2^i - \varepsilon_2^i) = a_1x_1^i + a_2x_2^i - (a_1\varepsilon_1^i + a_2\varepsilon_2^i) \\ a_1(x_1^{ii} - \varepsilon_1^{ii}) + a_2(x_2^{ii} - \varepsilon_2^{ii}) = a_1x_1^{ii} + a_2x_2^{ii} - (a_1\varepsilon_1^{ii} + a_2\varepsilon_2^{ii}) \\ a_1(x_1^{iii} - \varepsilon_1^{iii}) + a_2(x_2^{iii} - \varepsilon_2^{iii}) = a_1x_1^{iii} + a_2x_2^{iii} - (a_1\varepsilon_1^{iii} + a_2\varepsilon_2^{iii}) \end{array} \right\} \quad (1)$$

onde z_T é o verdadeiro valor de z para cada observação independente.

Os valores de z computados das observações são (GHILANI, 2017):

$$\begin{aligned} z^i &= a_1x_1^i + a_2x_2^i \\ z^{ii} &= a_1x_1^{ii} + a_2x_2^{ii} \\ z^{iii} &= a_1x_1^{iii} + a_2x_2^{iii} \\ &\vdots \end{aligned} \quad (2)$$

Substituindo a equação (2) na equação (1) e reagrupando a equação (1) para isolar os erros computados de cada valor, tem-se (GHILANI, 2017):

$$\begin{aligned} z^i - z_T &= a_1\varepsilon_1^i + a_2\varepsilon_2^i \\ z^{ii} - z_T &= a_1\varepsilon_1^{ii} + a_2\varepsilon_2^{ii} \\ z^{iii} - z_T &= a_1\varepsilon_1^{iii} + a_2\varepsilon_2^{iii} \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3)$$

Da equação de variância em uma população $n\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2$, e, portanto, para o caso considerado, a soma dos erros quadráticos para o valor computado é (GHILANI, 2017):

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 &= (a_1\varepsilon_1^i + a_2\varepsilon_2^i)^2 + (a_1\varepsilon_1^{ii} + a_2\varepsilon_2^{ii})^2 + (a_1\varepsilon_1^{iii} + a_2\varepsilon_2^{iii})^2 + \dots \\ &= n\sigma_Z^2 \end{aligned} \quad (4)$$

Expandindo os termos da equação (4) tem-se que (GHILANI, 2017):

$$\begin{aligned} n\sigma_Z^2 &= (a_1\varepsilon_1^i)^2 + 2a_1a_2\varepsilon_1^i\varepsilon_2^i + (a_2\varepsilon_2^i)^2 + (a_1\varepsilon_1^{ii})^2 + 2a_1a_2\varepsilon_1^{ii}\varepsilon_2^{ii} \\ &\quad + (a_2\varepsilon_2^{ii})^2 + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

E fatorando os termos da equação (5) tem-se (GHILANI, 2017):

$$\begin{aligned} n\sigma_Z^2 &= a_1^2(\varepsilon_1^{i^2} + \varepsilon_1^{ii^2} + \varepsilon_1^{iii^2} + \dots) + a_2^2(\varepsilon_2^{i^2} + \varepsilon_2^{ii^2} + \varepsilon_2^{iii^2} + \dots) \\ &\quad + 2a_1a_2(\varepsilon_1^i\varepsilon_2^i + \varepsilon_1^{ii}\varepsilon_2^{ii} + \varepsilon_1^{iii}\varepsilon_2^{iii} + \dots) \end{aligned} \quad (6)$$

Ao se inserir os símbolos de somatório para os termos de erro na equação (6), tem-se como resultado (GHILANI, 2017):

$$\sigma_z^2 = a_i^2 \left(\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_1^2}{n} \right) + 2a_1 a_2 \left(\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_1 \varepsilon_2}{n} \right) + a_2^2 \left(\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_2^2}{n} \right) \quad (7)$$

E reorganizando os termos dos parênteses da equação (7), que são por definição: $\sigma_{x_1}^2$, $\sigma_{x_1 x_2}$, e $\sigma_{x_2}^2$, respectivamente, a equação (7) pode ser reescrita da seguinte forma (GHILANI, 2017):

$$\sigma_z^2 = a_1^2 \sigma_{x_1}^2 + 2a_1 a_2 \sigma_{x_1 x_2} + a_2^2 \sigma_{x_2}^2 \quad (8)$$

Na equação (8) o termo do meio, $\sigma_{x_1 x_2}$, é conhecido como covariância. Esse termo mostra a interdependência entre as duas variáveis x_1 e x_2 . Quando o termo de covariância diminui, a interdependência das variáveis também diminui. E quando esse termo é igual a zero as variáveis são ditas como matematicamente independentes.

As equações (7) e (8) podem ser escritas na forma matricial da seguinte forma (GHILANI, 2017):

$$\Sigma_{zz} = [a_1 \ a_2] \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & \sigma_{x_1 x_2} \\ \sigma_{x_1 x_2} & \sigma_{x_2}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

onde, Σ_{zz} é a matriz de variância-covariância para a função z . Se z é função de n medidas de quantidades independentes (x_1, x_2, \dots, x_n), então Σ_{zz} é (GHILANI, 2017):

$$\Sigma_{zz} = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n] \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & \sigma_{x_1 x_2} & \dots & \sigma_{x_1 x_n} \\ \sigma_{x_1 x_2} & \sigma_{x_2}^2 & & \sigma_{x_2 x_n} \\ \vdots & & \ddots & \dots \\ \sigma_{x_1 x_n} & \sigma_{x_2 x_n} & & \sigma_{x_n}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

Além disso, para um conjunto de m funções com n quantidades de medidas independentes, (x_1, x_2, \dots, x_n), a equação (10) expande para (GHILANI, 2017):

$$\begin{aligned} & \Sigma_{zz} \quad (11) \\ &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & \sigma_{x_1 x_2} & \dots & \sigma_{x_1 x_n} \\ \sigma_{x_1 x_2} & \sigma_{x_2}^2 & \dots & \sigma_{x_2 x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{x_1 x_n} & \sigma_{x_2 x_n} & \dots & \sigma_{x_n}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{m2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Similarmente, se a função é não-linear, a expansão de primeira ordem da série de Taylor pode ser utilizada para linearizar a função. Portanto, a_{11}, a_{12}, \dots , são

substituídos pela derivada parcial de Z_1, Z_2, \dots em relação aos parâmetros desconhecidos, x_1, x_2, \dots, x_n . Depois de linearizar as equações não-lineares, a matriz para a função Z, pode ser escrita na forma linear como (GHILANI, 2017):

$$\Sigma_{ZZ} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Z_1}{\partial x_1} & \frac{\partial Z_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial Z_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial Z_2}{\partial x_1} & \frac{\partial Z_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial Z_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial Z_m}{\partial x_1} & \frac{\partial Z_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial Z_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & \sigma_{x_1 x_2} & \dots & \sigma_{x_1 x_n} \\ \sigma_{x_1 x_2} & \sigma_{x_2}^2 & \dots & \sigma_{x_2 x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{x_1 x_n} & \sigma_{x_2 x_n} & \dots & \sigma_{x_n}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial Z_1}{\partial x_1} & \frac{\partial Z_2}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial Z_m}{\partial x_1} \\ \frac{\partial Z_1}{\partial x_2} & \frac{\partial Z_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial Z_m}{\partial x_2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial Z_1}{\partial x_n} & \frac{\partial Z_2}{\partial x_n} & \dots & \frac{\partial Z_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (12)$$

As equações (11) e (12) são conhecidas como lei de propagação das covariâncias para equações lineares e não lineares, respectivamente. Essas equações podem ser escritas (ambas) da seguinte forma (GHILANI, 2017):

$$\Sigma_{ZZ} = A \Sigma A^T \quad (13)$$

onde Σ_{ZZ} é a matriz de covariância da função Z. O coeficiente matricial A é chamado de matriz Jacobiana. Isso é, uma matriz das derivadas parciais em relação às incógnitas (como mostrado na equação 12).

Se as observações x_1, x_2, \dots, x_n , não são correlacionadas, isso é, elas são estatisticamente independentes, então os termos de covariância $\sigma_{x_1 x_2}, \sigma_{x_1 x_3}, \dots$ são iguais a zero, logo, as equações (11 e 12) podem ser reescritas respectivamente como (GHILANI, 2017):

$$\Sigma_{ZZ} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{x_2}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{x_n}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{m1} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{mn} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\Sigma_{ZZ} \quad (15)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial Z_1}{\partial x_1} & \frac{\partial Z_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial Z_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial Z_2}{\partial x_1} & \frac{\partial Z_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial Z_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial Z_m}{\partial x_1} & \frac{\partial Z_m}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial Z_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x_1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{x_2}^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{x_n}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial Z_1}{\partial x_1} & \frac{\partial Z_2}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial Z_m}{\partial x_1} \\ \frac{\partial Z_1}{\partial x_2} & \frac{\partial Z_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial Z_m}{\partial x_2} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial Z_1}{\partial x_n} & \frac{\partial Z_2}{\partial x_n} & \dots & \frac{\partial Z_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

Se existir apenas uma função Z , envolvendo n quantidades não-correlacionadas, x_1, x_2, \dots, x_n , a equação (15) pode ser escrita na forma algébrica da seguinte forma (GHILANI, 2017):

$$\sigma_Z = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_1} \sigma_{x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_2} \sigma_{x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_n} \sigma_{x_n}\right)^2} \quad (16)$$

As equações (14), (15) e (16) consistem na lei de propagação das covariâncias para quantidades não correlacionadas. Essas equações permitem verificar a maneira pela qual os erros de observações estatisticamente independentes se propagam em uma função. Nessas equações, cada termo representa uma contribuição individual para o erro total que ocorre como o resultado dos erros de observação de cada variável independente. Quando o tamanho do erro estimado de uma função é muito grande, investigações sobre esses termos individuais irão indicar quais são os maiores contribuidores para o erro total. O método mais eficiente para reduzir este valor na função é avaliar maneiras de reduzir o valor do termo que apresentar maior erro na equação (16) por exemplo.

Na pré-análise, a qualidade final que se deseja alcançar (valor de σ_Z) já é conhecida, e a partir daí se estabelecem critérios observacionais para atingir este determinado resultado final, ou seja, determina-se o modelo matemático, a geometria do trabalho e os equipamentos que poderão atingir essa precisão estabelecida previamente. Nesta etapa também é importante considerar alguns aspectos como a confiabilidade, custo, sensibilidade, robustez, entre outros.

Sabe-se que ao repetir muitas vezes uma mesma medida pode-se atingir uma precisão determinada nesta etapa de pré-análise. Logo, se cada observação (x_n) for observada n_i vezes, a equação (16) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\sigma_Z = \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x_1}\right)^2 \frac{\sigma_{x_1}^2}{n_1} + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_2}\right)^2 \frac{\sigma_{x_2}^2}{n_2} + \dots + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_n}\right)^2 \frac{\sigma_{x_n}^2}{n_i}} \quad (17)$$

Assim, os elementos da equação 17 podem ser interpretados da seguinte forma (DALAZOANA, 2015):

- σ_Z : Está relacionado com a precisão final requerida para a função Z, já predefinida;
- $\frac{\partial Z}{\partial x_n}$: Reflete o efeito do modelo matemático e da geometria adotados;
- $\frac{\sigma_{x_n}}{n_i}$: Reflete o efeito do equipamento escolhido e do número de observações.

Problemas simples de pré-análise podem ser resolvidos empregando-se esses conceitos de propagação de erros e propagação de covariâncias: equações (14), (15), (16) e (17). Além disso, é necessário estabelecer o modelo matemático adequado para a resolução do problema (determinar a função Z), e, muitas vezes, uma estimativa a priori das observações, ou seja, valores estimados para as observações, pois muitas vezes a função Z é uma função não linear. Desta forma, a solução das derivadas parciais requer valores estimados para as observações (x_n).

Na pré-análise, tal como no ajustamento das observações, assume-se que as observações estão isentas de erros grosseiros e sistemáticos. As variâncias ou os desvios-padrão são utilizados como estimativas da qualidade das observações (DALAZOANA, 2015).

2.2.3 Elipses de erro

A elipse de erro é a representação gráfica da precisão dos resultados do ajustamento. Os eixos da elipse de erros representam os desvios-padrão máximo e mínimo de uma coordenada em relação ao sistema cartesiano em que o ponto está referenciado. A covariância caracteriza a existência do ângulo de orientação θ , que é a rotação do semieixo maior da elipse em relação ao sistema cartesiano do ponto (CRUZ, 2015).

Após o ajustamento das observações, os desvios-padrão estimados para as coordenadas ajustadas podem ser calculados a partir dos elementos da matriz de

covariância. Os parâmetros da elipse de erro, apresentados na FIGURA 3, podem ser obtidos pelas equações (18), (19) e (20) (GEMAEL, MACHADO e WANDRESEN, 2015):

$$\sigma^2 \text{ máx} = \frac{1}{2} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2}) \quad (18)$$

$$\sigma^2 \text{ min} = \frac{1}{2} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sqrt{(\sigma_x^2 - \sigma_y^2)^2 + 4\sigma_{xy}^2}) \quad (19)$$

$$\text{Tg } 2\theta = \frac{2\sigma_{xy}}{\sigma_x^2 - \sigma_y^2} \quad (20)$$

onde:

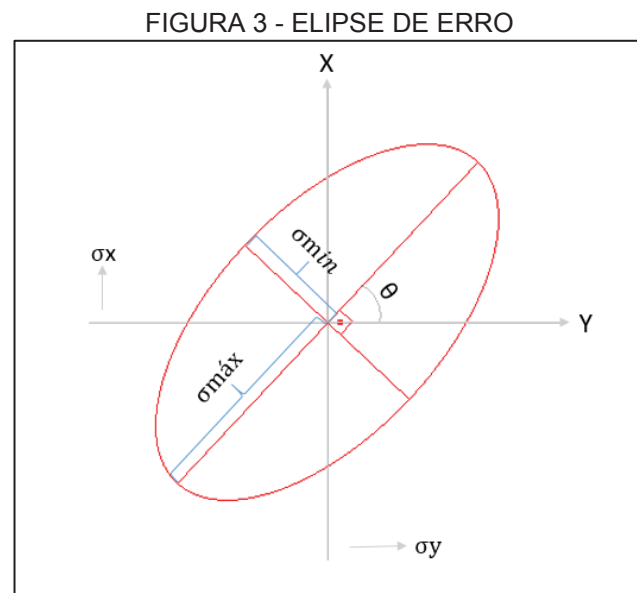
$\sigma^2 \text{ máx}$ e $\sigma^2 \text{ min}$: variância máxima e variância mínima;

σ_x^2 : variância em x;

σ_y^2 : variância em y;

σ_{xy} : covariância entre as coordenadas x e y;

θ : orientação do semieixo maior da elipse.



FONTE: ADAPTADO DE GEMAEL, MACHADO e WANDRESEN (2015)

2.3 MÉTODO DE ESTAÇÃO LIVRE

O método de estação livre também é conhecido na literatura como método de ressecção ou intersecção a ré. Este método consiste em estacionar um instrumento topográfico sobre o ponto que se deseja determinar as coordenadas e realizar observações de direções a três pontos de coordenadas conhecidas (SILVA e SEGANTINI, 2015). As coordenadas do ponto da estação são determinadas sem a necessidade da medição de distância entre os pontos observados.

Nos trabalhos de levantamento, os métodos mais comuns para calcular as coordenadas de um ponto por ressecção são o Método de Cassini e a fórmula de Tienstra, embora a primeira solução conhecida tenha sido dada por Willebrord Snellius, determinada como Problema de Pothenot, detalhes sobre o Problema de Pothenot podem ser obtidos em Espartel (1987). Ao aplicar este método de posicionamento, os pontos com coordenadas conhecidas utilizados para o cálculo da coordenada da estação, não podem formar um círculo onde a posição do instrumento seja o centro do mesmo, pois não haverá solução ou a mesma poderá ser errônea para este caso.

Como a posição da estação total não precisa ser necessariamente materializada, o método de estação livre se torna viável para o levantamento de detalhes que estão em locais de difícil acesso, além de ser mais prático em relação ao método de poligonação, por exemplo. É possível a orientação da estação a partir de três pontos, mas com no mínimo dois pontos conhecidos já se podem calcular as coordenadas dos pontos ocupados pela estação total (ALVES, 2012).

Neste contexto, pode-se também resolver o método de estação livre utilizando o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Gemael, Machado e Wandresen (2015) afirmam que, a partir de observações redundantes sujeitas a flutuações probabilísticas e de uma estimativa de sua precisão, o ajustamento tem por objetivo: estimar, mediante a aplicação de modelos matemáticos funcionais adequados e do MMQ, um valor único para cada uma das incógnitas do problema; e estimar, mediante a aplicação de modelos matemáticos estocásticos adequados e do MMQ, a precisão de tais incógnitas e a eventual correlação entre elas. O MMQ tem como princípio a minimização da soma dos quadrados dos resíduos, isto é, $\Phi = V^T P V = \text{mín}$, onde P corresponde a uma matriz quadrada dos pesos, e V corresponde a um vetor coluna dos resíduos.

Para aplicar o MMQ com a finalidade de estimar o valor dos parâmetros, utiliza-se o Método Paramétrico, em que os valores observados ajustados podem ser expressos como uma função dos parâmetros ajustados, com isso, tem-se o método conhecido como paramétrico, no qual se considera o seguinte modelo matemático:

$L_a = F(X_a)$. Então, sejam (GEMAEL, MACHADO e WANDRESEN, 2015):

L_b : vetor ($n \times 1$) dos valores observados;

V : vetor ($n \times 1$) dos resíduos;

L_a : vetor ($n \times 1$) dos valores observados ajustados;

n : equações de observação.

Tem-se que:

$$L_a = L_b + V \quad (29)$$

e:

$$X_a = X_0 + X \quad (30)$$

onde:

X_0 : vetor ($u \times 1$) com valores aproximados dos parâmetros;

X : vetor correção ($u \times 1$);

X_a : vetor dos parâmetros ajustados (um dos objetivos);

u : número de incógnitas.

Para a aplicação desse método é necessário montar as equações de observação, que compõem o modelo matemático relacionando parâmetros e observações. Para facilitar o entendimento do modelo matemático adotado para o método de estação livre, observa-se a FIGURA 4, onde tem-se que:

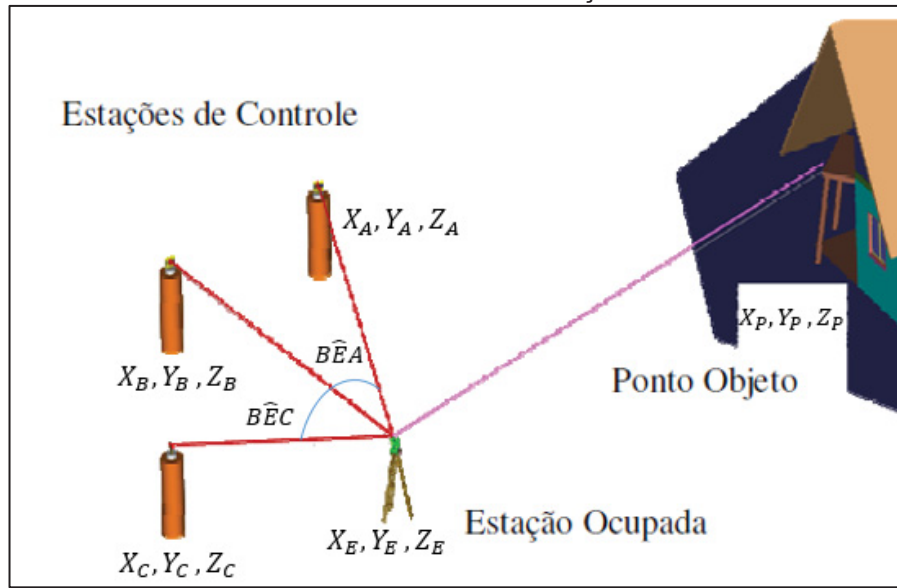
X_A, Y_A, Z_A : coordenadas do ponto da estação de controle A;

X_B, Y_B, Z_B : coordenadas do ponto da estação de controle B;

X_C, Y_C, Z_C : coordenadas do ponto da estação de controle C;

X_E, Y_E, Z_E : coordenadas do ponto da estação livre E.

FIGURA 4 - MÉTODO DE ESTAÇÃO LIVRE



FONTE: ADAPTADO DE MIRANDA E VEIGA (2010)

O modelo matemático para as distâncias entre os pontos A-E, B-E e C-E é o apresentado na equação (21). As medidas dos ângulos zenitais entre as direções A-E, B-E e C-E, podem ser estimadas utilizando a equação (22). E os ângulos $B\hat{E}A$ e $B\hat{E}C$ podem ser estimados utilizando a equação (23). Com isso tem-se as equações que serão utilizadas como modelo matemático no método paramétrico para o método de estação livre, desenvolvidas para distâncias, ângulos horizontais e ângulos zenitais que são respectivamente:

$$l_1^a = l_1^b + v_1 = \sqrt{(X_A - X_E)^2 + (Y_A - Y_E)^2 + (Z_A - Z_E)^2} \quad (31)$$

$$l_2^a = l_2^b + v_2 = \sqrt{(X_B - X_E)^2 + (Y_B - Y_E)^2 + (Z_B - Z_E)^2} \quad (32)$$

$$l_3^a = l_3^b + v_3 = \sqrt{(X_C - X_E)^2 + (Y_C - Y_E)^2 + (Z_C - Z_E)^2} \quad (33)$$

$$l_4^a = l_4^b + v_4 = \arctg \left(\frac{X_A - X_E}{Y_A - Y_E} \right) - \arctg \left(\frac{X_B - X_E}{Y_B - Y_E} \right) \quad (34)$$

$$l_5^a = l_5^b + v_5 = \arctg \left(\frac{X_B - X_E}{Y_B - Y_E} \right) - \arctg \left(\frac{X_C - X_E}{Y_C - Y_E} \right) \quad (35)$$

$$l_6^a = l_6^b + v_6 = \arccos \frac{Z_A - Z_E}{\sqrt{(X_A - X_E)^2 + (Y_A - Y_E)^2 + (Z_A - Z_E)^2}} \quad (36)$$

$$l_7^a = l_7^b + v_7 = \arccos \frac{Z_B - Z_E}{\sqrt{(X_B - X_E)^2 + (Y_B - Y_E)^2 + (Z_B - Z_E)^2}} \quad (37)$$

$$l_8^a = l_8^b + v_8 = \arccos \frac{Z_C - Z_E}{\sqrt{(X_C - X_E)^2 + (Y_C - Y_E)^2 + (Z_C - Z_E)^2}} \quad (38)$$

Após a definição do modelo matemático, que descreve as observações como função de parâmetros a serem determinados, é possível realizar o ajustamento, que, para facilitar o entendimento, pode ser dividido em tópicos:

a) Primeiro calcula-se o vetor L :

$$L = L_0 - L_b \quad (39)$$

Para o cálculo de L_0 substitui-se X_a por X_0 no modelo matemático, onde X_0 representa uma solução inicial aproximada para o vetor dos parâmetros. Ou seja, no caso do método de estação livre serão as coordenadas X_E, Y_E, Z_E iniciais estimadas. E L_b são as observações efetuadas;

b) Posteriormente calcula-se a matriz das derivadas parciais A (derivadas parciais das equações de observação em relação aos parâmetros) em X_0 :

$$A = \left. \frac{\partial F}{\partial X_a} \right|_{X_0} = \begin{bmatrix} \frac{\partial l_{1a}}{\partial X_a} & \frac{\partial l_{1a}}{\partial Y_a} & \frac{\partial l_{1a}}{\partial Z_a} \\ \frac{\partial l_{2a}}{\partial X_a} & \frac{\partial l_{2a}}{\partial Y_a} & \frac{\partial l_{2a}}{\partial Z_a} \\ \frac{\partial l_{3a}}{\partial X_a} & \frac{\partial l_{3a}}{\partial Y_a} & \frac{\partial l_{3a}}{\partial Z_a} \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \quad (40)$$

c) Montagem da matriz dos pesos;

A matriz dos pesos é uma matriz quadrada e na sua diagonal foram inseridos os valores das inversas das precisões das distâncias e dos ângulos, ao quadrado.

d) Faz-se o cálculo de N :

$$N = A^T P A \quad (41)$$

e) Calcula-se U :

$$U = A^T P L \quad (42)$$

f) E o cálculo das equações normais:

$$X = -N^{-1} U \quad (43)$$

A solução das equações normais, dada pelo vetor X , permite converter os parâmetros aproximados em parâmetros ajustados:

$$X_a = X_0 + X \quad (44)$$

2.4 IRRADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL

Existem diferentes técnicas de levantamento geodésico para fins de monitoramento, como por exemplo: gravimetria, nivelamento geométrico, posicionamento GNSS e irradiação tridimensional. A determinação de coordenadas de pontos empregando-se técnicas geodésicas convencionais está fundamentada na medição de grandezas como direções horizontais, ângulos verticais, distâncias e desníveis, a partir das quais, indiretamente, é possível computar as coordenadas de um ponto.

O método de irradiação tridimensional, também conhecido como método polar, permite a determinação de coordenadas tridimensionais de um ponto, a partir da medição de direções horizontais, ângulos verticais e distâncias inclinadas entre a estação e o ponto a ser medido (SILVA e SEGANTINI, 2015). São consideradas as medidas tomadas entre: a) os pontos com as coordenadas a serem monitoradas, e b) o ponto correspondente à posição da estação ocupada com o instrumento de medida.

No contexto da pré-análise, como são necessários valores estimados para as observações, estes podem ser calculados a partir de valores aproximados para as coordenadas, medidas em um referencial local, da seguinte forma:

1) Cálculo da distância espacial entre o ponto E (ponto correspondente à posição da estação total) e os pontos P (pontos a serem monitorados):

$$d_{EPi} = \sqrt{(X_{Pi} - X_E)^2 + (Y_{Pi} - Y_E)^2 + (Z_{Pi} - Z_E)^2} \quad (21)$$

onde:

X_{Pi}, Y_{Pi}, Z_{Pi} : coordenadas do i -ésimo ponto a ser monitorado;

X_E, Y_E, Z_E : coordenadas da posição da estação total;

d_{PEi} : distância entre a estação total e o ponto a ser monitorado;

2) Cálculo do ângulo zenital entre E e P :

$$V_{EPi} = \arccos \frac{Z_{Pi} - Z_E}{\sqrt{(X_{Pi} - X_E)^2 + (Y_{Pi} - Y_E)^2 + (Z_{Pi} - Z_E)^2}} \quad (22)$$

onde:

V_{EPi} : ângulo zenital calculado entre a estação total e o ponto a ser monitorado.

3) Cálculo do azimuth da direção formada entre E e P :

$$A_{EP} = \arctan \frac{X_{Pi} - X_E}{Y_{Pi} - Y_E} \quad (23)$$

onde:

A_{EPi} : azimuth calculado para a direção formada entre a estação total e o ponto a ser monitorado;

4) Cálculo dos ângulos horizontais:

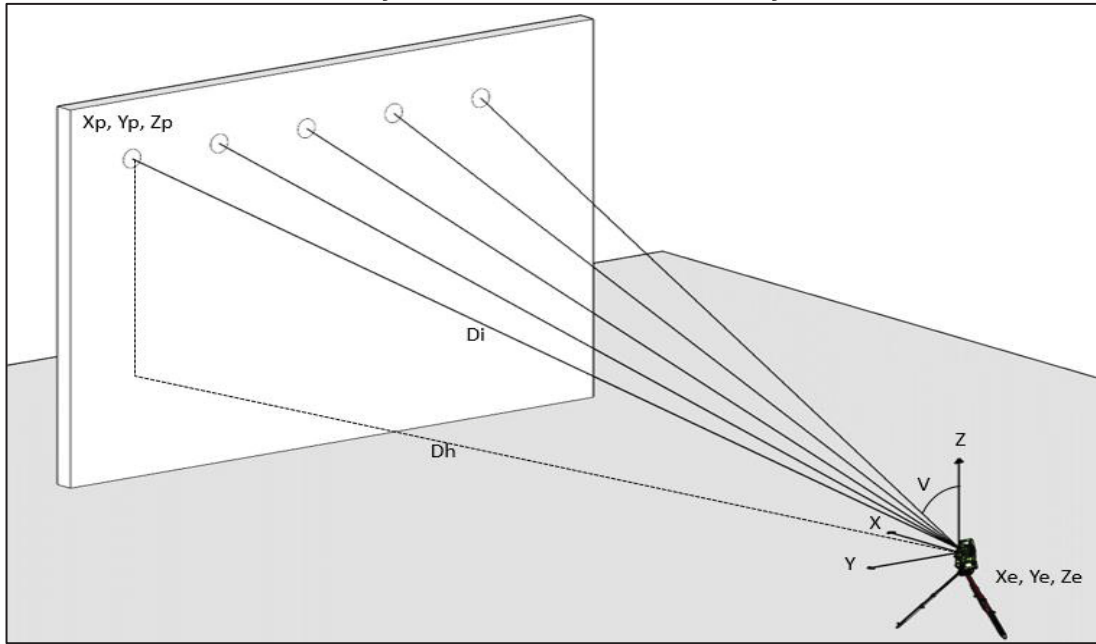
$$H_{EPi+1} = A_{EPi+1} - A_{EPi} \quad (24)$$

onde:

H_{EPi+1} : ângulo horizontal formado entre duas direções $EPi + 1$ e EPi .

A representação das coordenadas é realizada através de um sistema com três eixos ortogonais entre si, formando um sistema de coordenadas tridimensionais ortogonais (FIGURA 5).

FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DO MÉTODO DE IRRADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL



FONTE: A AUTORA (2019)

Considerando o sistema de coordenadas representado na FIGURA 5, tem-se que as coordenadas dos pontos monitorados são obtidas a partir das equações de posicionamento neste sistema, que são:

$$X_{Pi} = d_{EPi} \sin V_{EPi} \sin A_{EPi} + X_E \quad (25)$$

$$Y_{Pi} = d_{EPi} \sin V_{EPi} \cos A_{EPi} + Y_E \quad (26)$$

$$Z_{Pi} = d_{EPi} \cos V_{EPi} + Z_E \quad (27)$$

onde:

X_{Pi}, Y_{Pi}, Z_{Pi} : coordenadas dos pontos a serem monitorados;

d_{EPi} : distância entre os pontos a serem monitorados e a estação total;

V_{EPi} : ângulo zenital entre a estação e os pontos a serem monitorados;

A_{EPi} : azimute calculado para a direção formada entre a estação total e os pontos a serem monitorados;

X_E, Y_E, Z_E : coordenadas do ponto ocupado pela estação total;

A altura do instrumento não foi considerada na definição destas equações, uma vez que se considerou que a estação foi orientada nesta posição a partir do método de estação livre, e a origem do sistema de coordenadas como sendo coincidente com o eixo óptico do equipamento.

Para a obtenção dos desníveis, e conseqüentemente da coordenada Z apresentada na equação (27), quando se utiliza lances longos (acima de 150m), deve-se levar em consideração a influência da curvatura da Terra e da refração atmosférica. Assim, acrescenta-se nessa equação um termo referente à correção relativa a essas duas influências citadas, tendo como resultado a seguinte equação:

$$Z_{Pi} = h_i + [Dh \cot g(V_{Epi})] + \left[\frac{Dh^2}{2R} (1 - k) \right] \quad (28)$$

onde:

h_i : altura do instrumento;

Dh : distância horizontal entre os pontos;

R : raio aproximado da Terra;

k : coeficiente de refração, variável para região, ano e para as horas do dia.

No Brasil utiliza-se o coeficiente médio de $k = 0,13$.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para o desenvolvimento da pesquisa, foram utilizados programas que permitiram a elaboração de rotinas de programação para o cálculo iterativo das propagações de erro, além de programas que facilitaram a manipulação e visualização dos dados a serem avaliados para uma melhor representação dos mesmos, sendo estes:

- ✓ QGIS versão 2.14.14 – <<http://www.qgis.org>> Software gratuito e de código aberto para Sistemas de Informações Geográficas. Desenvolvido por: *The Open Source Geospatial Foundation (OSGEO)*;
- ✓ PgAdmin III - <<https://www.pgadmin.org>> é uma plataforma de administração e desenvolvimento de código aberto para o *PostgreSQL*, que é um banco de dados também de código aberto;
- ✓ Python 3.0 - <<https://www.python.org>> - *Python* é uma linguagem de programação que permite trabalhar e integrar sistemas com mais eficiência. Ele é desenvolvido sob uma licença de código aberto;
- ✓ QtDesigner – O *QtDesigner* é uma ferramenta utilizada para projetar e construir interfaces gráficas de usuário (GUIs). Esse software foi utilizado para construção da interface gráfica do *plugin* desenvolvido no software QGIS;
- ✓ Notepadqq – É um editor de texto, que foi utilizado tanto para a manipulação do código desenvolvido em *Python*, como para a configuração e edição dos dados para sua representação;
- ✓ AUTOCAD 2018 – versão estudante. Esse software foi utilizado para visualização e manipulação dos dados 3D;
- ✓ ParaView 5.5 - RC4 - <<https://www.paraview.org/>> O *ParaView* é um software livre que permite a visualização e análise de dados. Nesse programa é possível criar visualizações para análise de dados qualitativas e quantitativas. A exploração de dados pode ser feita interativamente em 3D ou a partir de comandos de programação;

Também foram utilizados ortofotos e um modelo 3D da área de estudo para facilitar o reconhecimento da mesma.

3.2 ESTUDO DE CASO

Para o estudo de caso abordado neste trabalho utilizou-se informações referentes à área de estudo da Usina Hidrelétrica de Mauá, localizada no rio Tibagi, entre os Municípios de Ortigueira e Telêmaco Borba, no estado do Paraná. A área avaliada pode ser visualizada na FIGURA 6.

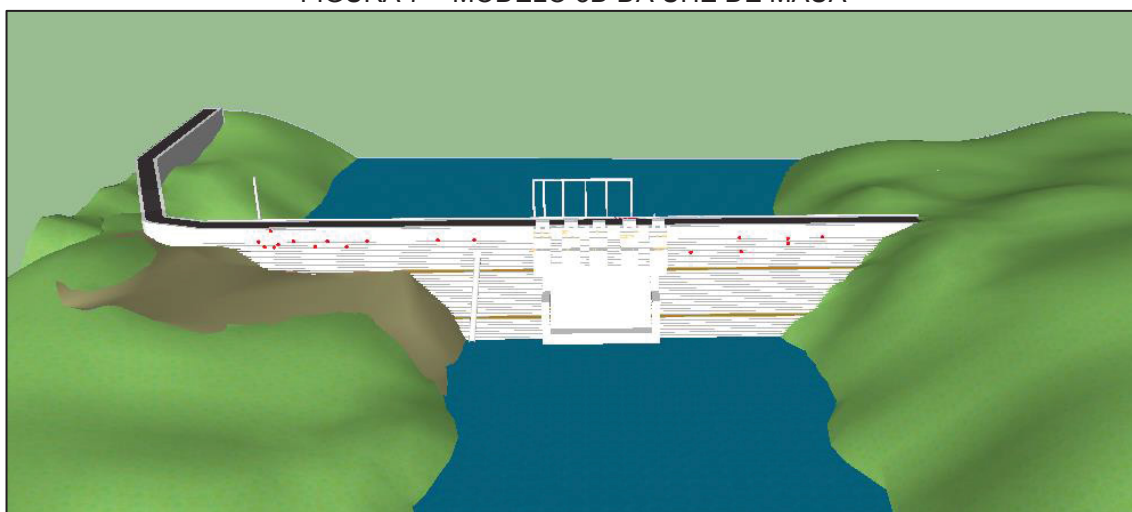
FIGURA 6 - USINA HIDRELÉTRICA DE MAUÁ



FONTE: FAGGION, NADAL E VEIGA (2012)

Alguns trabalhos desenvolvidos na Universidade Federal do Paraná (UFPR) realizaram atividades ligadas ao monitoramento da estrutura da barragem de Mauá, como por exemplo os trabalhos realizados por Faggion, Nadal e Veiga (2012), Siguel (2013), Cruz (2015) e Gonçalves (2018). A partir desses estudos, foram disponibilizados alguns dados referentes a essa área de estudo, dentre eles um arquivo contendo o desenho da estrutura em 3D (FIGURA 7), o qual foi utilizado como base para a geração de uma nuvem de pontos.

FIGURA 7 – MODELO 3D DA UHE DE MAUÁ

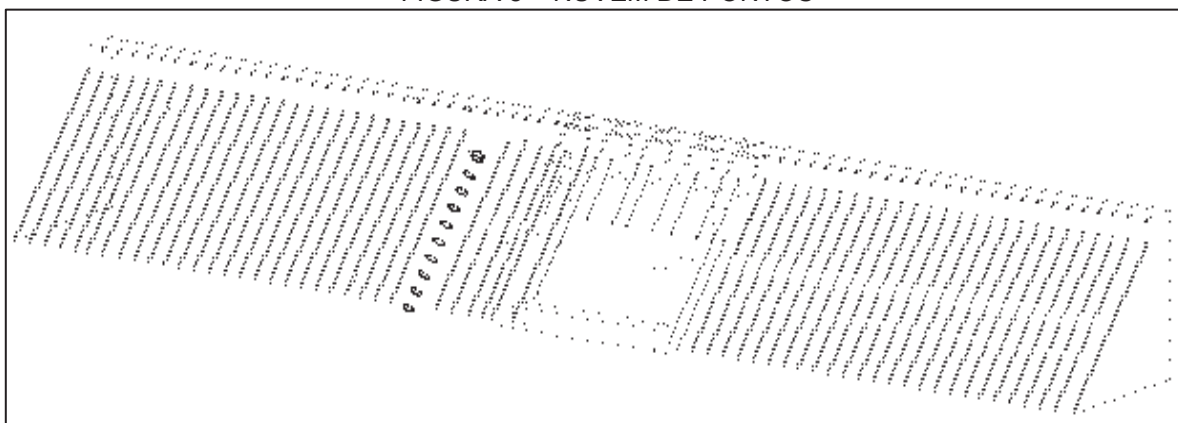


FONTE: GONÇALVES (2018)

Com base nesse modelo 3D apresentado, foi simulada uma nuvem de pontos contornando toda a estrutura da barragem, a fim de modelar essa estrutura e obter coordenadas tridimensionais aproximadas para o conjunto de pontos. Esses pontos foram criados no software *Autocad* utilizando uma ferramenta de criação de pontos. Os pontos foram distribuídos na fachada a jusante da barragem, e, ao todo, foram criados aproximadamente 5000 pontos (FIGURA 8).

A partir das coordenadas aproximadas destes pontos e das coordenadas aproximadas da estação total podem ser obtidos valores aproximados para as observações, necessárias ao método da irradiação tridimensional, e necessárias para a realização da propagação dos erros.

FIGURA 8 – NUVEM DE PONTOS

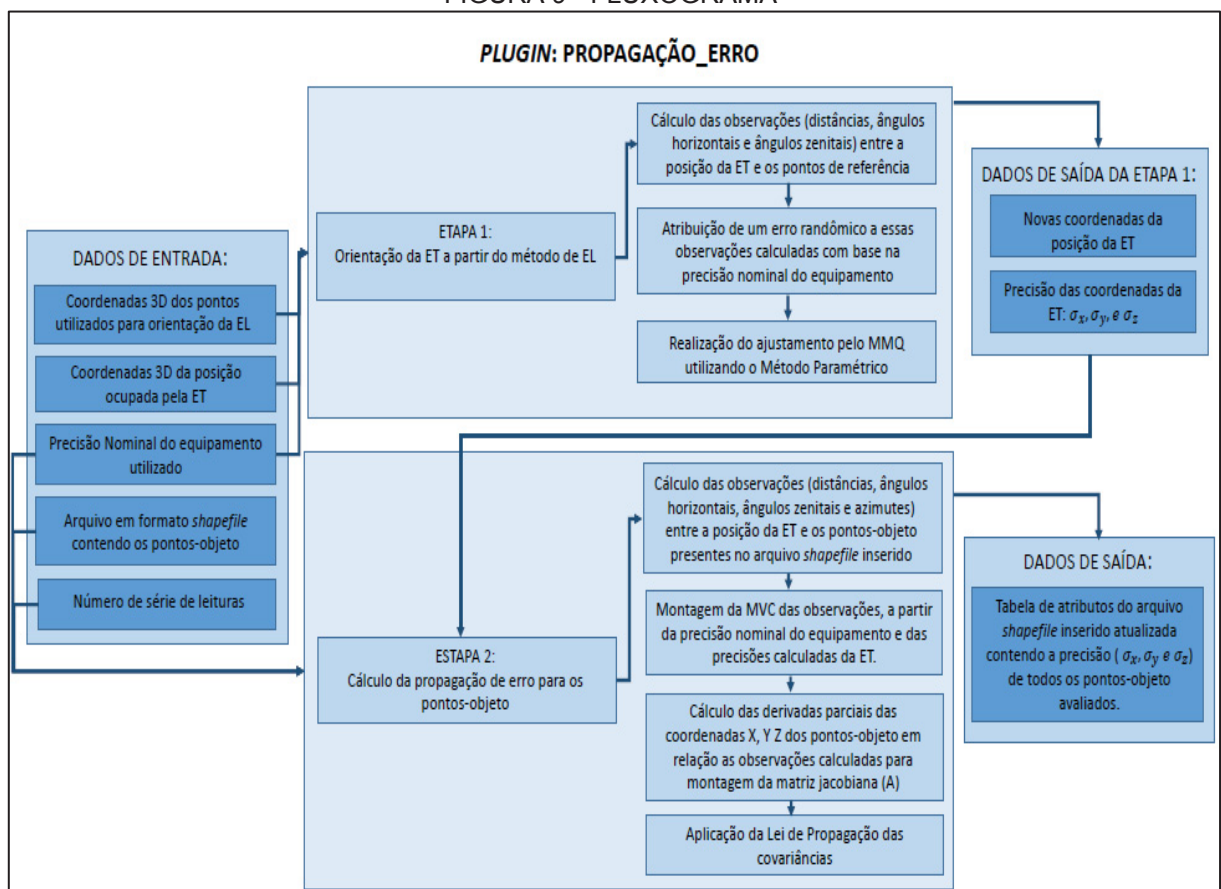


FONTE: A AUTORA (2019)

3.3 DESENVOLVIMENTO DA APLICAÇÃO GEOESPACIAL UTILIZANDO *PYTHON*

Com o objetivo de calcular de forma interativa o valor das precisões das coordenadas dos pontos-objeto, desenvolveu-se um *plugin*, no software livre *QuantumGis*, com uma rotina de programação que permite a realização destes cálculos. Para facilitar o entendimento desse *plugin*, desenvolveu-se um fluxograma (FIGURA 9) no qual são apresentados os dados de entrada, os dados de saída e as etapas da rotina de programação que foi desenvolvida.

FIGURA 9 - FLUXOGRAMA



FONTE: A AUTORA (2019)

Além da precisão nominal do equipamento o usuário também deve inserir no *plugin* um arquivo no formato *shapefile* contendo as coordenadas aproximadas dos pontos que possivelmente serão monitorados. Essa extensão de arquivo em formato *shapefile* armazena a posição, forma e atributos de feições geográficas, em que os atributos são as características das feições geográficas e estas podem ser pontos, linhas ou polígonos. Ou seja, para o caso da aplicação em questão tem-se a

representação dos pontos, sua posição é armazenada por meio das coordenadas tridimensionais, e os atributos são os valores dos desvios-padrão calculados para cada ponto. Esses atributos são organizados em forma de tabela nesse formato de arquivo. Assim, no arquivo *shapefile* contendo os pontos da estrutura (barragem), foram criados campos na tabela de atributos para que os resultados obtidos com os cálculos de propagação de erros fossem armazenados nesses espaços.

Com isso, como resultado o *plugin* atualiza a tabela de atributos dos pontos a serem monitorados, e devem constar nessa tabela os valores do $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ (das precisões calculadas para as coordenadas X, Y e Z dos pontos a serem monitorados). Além desses valores o *plugin* calcula também uma resultante da precisão tridimensional das coordenadas, aqui denominado de *dp3d* (equação 46), e da precisão bidimensional, *dp2d* (equação 45) utilizando as seguintes fórmulas:

$$dp2d = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (45)$$

$$dp3d = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (46)$$

Para a criação desse aplicativo no programa *QuantumGis*, utilizou-se a ferramenta *Plugin Builder*. Essa ferramenta permite a criação do *plugin* que poderá ser visualizado dentro do *QuantumGis*. O nome do *plugin* criado para a realização dos cálculos de propagação de erro mostrados anteriormente, foi “Propagação_Erro”.

Para construir a interface gráfica do *plugin*, utilizou-se o programa *QT-designer* que permite a criação de janelas para entrada dos dados que serão utilizados para o cálculo dos desvios-padrão. Os dados de entrada para o *plugin* “Propagação_Erro” foram:

- As coordenadas X (m), Y (m) e Z (m), em um sistema de coordenadas local, dos pontos A, B e C que servirão de apoio para a orientação da estação livre.
- As coordenadas X_E (m), Y_E (m) e Z_E (m), em metros, e em um sistema de coordenadas local, da posição referente ao ponto de instalação da estação total;

- A precisão angular e linear da estação que será utilizada no monitoramento dos pontos;
- As coordenadas $X_i(m)$, $Y_i(m)$ e $Z_i(m)$, em um sistema de coordenadas local, dos pontos-objeto. Essas coordenadas são obtidas do arquivo *Shapefile* que será inserido no programa;
- E o número de séries de leituras que se deseja executar.

Entre os dados de entrada, não constam as leituras lineares e angulares, pois estas são calculadas a partir dos demais dados de entrada.

Depois de construída a interface gráfica do *plugin*, iniciou-se a etapa de implementação das equações que permitem o cálculo dos desvios-padrão das coordenadas e o cálculo da posição e precisão da estação livre. As fórmulas utilizadas para esses cálculos foram implementadas em linguagem de programação *Python*, dentro do código correspondente ao *plugin* criado. Essa linguagem de programação permite o uso de diferentes bibliotecas que apresentam funções pré-existent, facilitando o processo de programação. No caso deste trabalho utilizou-se, por exemplo, a biblioteca *Numpy*, que permite *arrays* (arranjos) e matrizes multidimensionais, possuindo muitas funções matemáticas que facilitaram a implementação das matrizes para o cálculo da propagação de erro.

Decidiu-se utilizar uma conexão com o banco de dados para entrar com os pontos a serem monitorados, para isso utilizou-se também a biblioteca *Psycopg2*. Essa biblioteca permite a realização de funções ligadas aos dados existentes dentro de um banco de dados *PostgreSQL*. No trabalho em questão, foi criado um banco de dados, onde foi inserido um arquivo com extensão *shapefile* contendo os pontos-objeto (pontos que serão hipoteticamente monitorados) que serão utilizados para o cálculo da propagação de erros. Um possível usuário do *plugin* deve fazer o mesmo procedimento: criar um banco de dados e inserir nele um arquivo em formato *shapefile* contendo os pontos que esse usuário deseja monitorar. Dentro do código do *plugin*, deverão ser feitas as devidas conexões com o banco de dados utilizado, para a realização dos cálculos.

Após a devida conexão com o banco de dados, foram implementados os cálculos para a orientação da estação total pelo método de estação livre, e os cálculos da propagação de erros para o modelo matemático do método de irradiação tridimensional.

3.3.1 Orientação da estação total pelo método de estação livre

No desenvolvimento das simulações realizadas neste trabalho, decidiu-se pelo posicionamento do equipamento através do método de estação livre, no qual se orienta a estação total a partir de três pontos conhecidos. Dessa forma consegue-se calcular a coordenada tridimensional do ponto ocupado pela estação total e sua precisão. Sabe-se que é possível orientar a estação total somente com dois pontos conhecidos, porém a utilização de três pontos para essa orientação fornece uma abundância de observações, o que permite a realização do ajustamento de observações.

Como os dados utilizados são simulados neste trabalho, e não propriamente medidos, atribuiu-se um erro às observações. Esse erro foi determinado de forma aleatória, considerando o quanto se espera que pode variar uma observação medida devido à precisão nominal do equipamento. Utilizou-se então, para essa determinação, uma função pré-existente na linguagem de programação *Python* denominada “*np.random.standard_normal*”, que calcula um valor aleatório variando de 0 a 1 da distribuição normal. Esse valor foi multiplicado pelas precisões nominais do equipamento utilizado para a simulação e, com isso, obtiveram-se as observações com possíveis “erros” para a realização do ajustamento.

Decidiu-se realizar o ajustamento pelo método paramétrico, que permitiu o cálculo das coordenadas do ponto ocupado pela estação total e das suas respectivas precisões. As equações utilizadas como modelo matemático para o cálculo das coordenadas do ponto ocupado, e que permitiram a realização do ajustamento são as equações: (31), (32), (33), (34), (35), (36), (37), e (38), já citadas na revisão de literatura deste trabalho.

Com a precisão das coordenadas do ponto ocupado pela estação total calculadas, utilizou-se esses valores para o cálculo da propagação de erros.

3.3.2 Aplicação da Lei de Propagação das Covariâncias para o modelo matemático do método de irradiação tridimensional

Com a orientação da estação já realizada, e a precisão das coordenadas da posição da mesma calculada, realizou-se então a simulação do monitoramento dos pontos-objeto.

Na pré-análise não se tem, *a priori*, as observações, por isso estas podem ser estimadas a partir das coordenadas aproximadas dos pontos-objeto e da estação total. Estas coordenadas aproximadas são obtidas a partir de alguma forma de reconhecimento prévio do terreno ou da área de estudo. Como neste trabalho utilizaram-se as coordenadas dos pontos da nuvem de pontos criada da barragem, a partir das equações do método de irradiação tridimensional (equações 21, 22, 23 e 24) foi possível calcular os valores aproximados dos azimutes, dos ângulos verticais, das distâncias e das direções horizontais entre a posição da estação total e os possíveis pontos a serem monitorados.

Para a determinação da precisão (desvio-padrão) das coordenadas tridimensionais dos pontos a serem monitorados em uma estrutura, aplicou-se a lei de propagação das covariâncias para o método de irradiação tridimensional. O modelo matemático é dado pelas equações de posicionamento (equações 25, 26 e 27).

Na fórmula da propagação de covariância (equação 13) tem-se a matriz A que corresponde à matriz das derivadas parciais da função original (matriz jacobiana). No caso do modelo matemático utilizado, a matriz das derivadas parciais é determinada da seguinte forma:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial X}{\partial d} & \frac{\partial X}{\partial V} & \frac{\partial X}{\partial A} & \frac{\partial X}{\partial X_E} & \frac{\partial X}{\partial Y_E} & \frac{\partial X}{\partial Z_E} \\ \frac{\partial Y}{\partial d} & \frac{\partial Y}{\partial V} & \frac{\partial Y}{\partial A} & \frac{\partial Y}{\partial X_E} & \frac{\partial Y}{\partial Y_E} & \frac{\partial Y}{\partial Z_E} \\ \frac{\partial Z}{\partial d} & \frac{\partial Z}{\partial V} & \frac{\partial Z}{\partial A} & \frac{\partial Z}{\partial X_E} & \frac{\partial Z}{\partial Y_E} & \frac{\partial Z}{\partial Z_E} \end{bmatrix} \quad (47)$$

onde:

$\frac{\partial X}{\partial d}, \frac{\partial Y}{\partial d}, \frac{\partial Z}{\partial d}$: são as derivadas parciais do modelo matemático (das coordenadas X, Y e Z dos pontos monitorados) em relação à distância;

$\frac{\partial X}{\partial V}, \frac{\partial Y}{\partial V}, \frac{\partial Z}{\partial V}$: são as derivadas parciais do modelo matemático (das coordenadas X, Y e Z dos pontos monitorados) em relação ao ângulo zenital;

$\frac{\partial X}{\partial A}, \frac{\partial Y}{\partial A}, \frac{\partial Z}{\partial A}$: são as derivadas parciais do modelo matemático (das coordenadas X, Y e Z dos pontos monitorados) em relação ao azimute;

$\frac{\partial X}{\partial X_E}, \frac{\partial Y}{\partial X_E}, \frac{\partial Z}{\partial X_E}$: são as derivadas parciais do modelo matemático (das coordenadas X, Y e Z dos pontos monitorados) em relação à coordenada X_E do ponto ocupado pela estação total;

$\frac{\partial X}{\partial Y_E}, \frac{\partial Y}{\partial Y_E}, \frac{\partial Z}{\partial Y_E}$: são as derivadas parciais do modelo matemático (das coordenadas X, Y e Z dos pontos monitorados) em relação à coordenada Y_E do ponto ocupado pela estação total;

$\frac{\partial X}{\partial Z_E}, \frac{\partial Y}{\partial Z_E}, \frac{\partial Z}{\partial Z_E}$: são as derivadas parciais do modelo matemático (das coordenadas X, Y e Z dos pontos monitorados) em relação à coordenada Z_E do ponto ocupado pela estação total.

A fórmula da propagação de covariância apresenta também a matriz de variância-covariância (MVC) das observações estimadas, que para o caso da aplicação em questão será:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma d^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma V^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma A^2 \\ \sigma X_E^2 & \sigma_{x_e y_e} & \sigma_{x_e z_e} \\ \sigma_{y_e x_e} & \sigma Y_E^2 & \sigma_{y_e z_e} \\ \sigma_{z_e x_e} & \sigma_{z_e y_e} & \sigma Z_E^2 \end{bmatrix} \quad (48)$$

onde:

σd : é a precisão das distâncias;

σV : é a precisão dos ângulos zenitais;

σA : é a precisão dos azimutes;

σX_E : é a precisão da coordenada X_E da posição da estação total;

σY_E : é a precisão da coordenada Y_E da posição da estação total;

σZ_E : é a precisão da coordenada Z_E da posição da estação total;

$\sigma_{x_e y_e}$: é a covariância calculada para as coordenadas X_E , Y_E e Z_E .

As precisões das coordenadas X_E , Y_E e Z_E da posição da estação total foram obtidas a partir do ajustamento descrito no tópico anterior. As precisões dos azimutes, dos ângulos zenitais e das distâncias foram estimadas em função da precisão nominal do equipamento escolhido.

Os valores utilizados para a montagem da MVC foram calculados da seguinte forma: para o cálculo da precisão da distância medida será utilizada a equação 49,

descrita em Ghilani (2017), que permite estimar o erro de uma distância medida com um MED (medidor eletrônico de distância):

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{\sigma_i^2 + \sigma_t^2 + a^2 + (Db)^2}{n}} \quad (49)$$

onde:

σ_D : é o erro na distância medida;

σ_i : é o erro de centragem do instrumento;

σ_t : é o erro de centragem do refletor;

a : é a parte constante da precisão do equipamento;

b : é a parte variável da precisão do equipamento indicada em *ppm*;

D : é a distância medida;

n : quantidade de séries de leituras executadas.

No caso do trabalho em questão, como se deseja calcular o erro propagado apenas em função do equipamento utilizado, considerou-se o erro de centragem do equipamento igual a zero. E como as medições consideradas não utilizaram refletor, foram medidas direto na estrutura, então o erro de centragem do refletor também foi considerado igual a zero.

Para o cálculo da precisão angular é necessário entender que os ângulos são obtidos a partir da leitura de pares conjugados, sendo que a diferença entre as duas direções observadas permite a obtenção do ângulo. A precisão deste ângulo será função da precisão nominal angular da estação total. Normalmente para uma estação total, a precisão nominal angular é definida para um par de leituras conjugadas de uma direção. Assim, para uma estação total de 5", ao se efetuar a leitura da direção horizontal em um alvo em pontaria direta e depois em pontaria invertida, este valor indica que o desvio-padrão da média das duas leituras será de 5" (GIAA, 2002).

Para o cálculo de um ângulo (α) é considerada a diferença entre a leitura de duas direções que foram observadas em pontaria direta e inversa, ou seja, $\alpha = l_1 - l_2$, onde l_1 e l_2 são determinados como a média da leitura em pontaria direta e pontaria inversa. Então, devido a isso, para um ângulo (α) a precisão será de 7" ($5\sqrt{2}$). Os valores calculados para a precisão angular foram considerados na MVC para os valores de σ_V e de σ_A .

Após a montagem da matriz MVC com os valores das precisões das distâncias, dos ângulos zenitais, dos azimutes, e da altura do instrumento, aplicou-se a lei de propagação das covariâncias e obtiveram-se os valores das precisões $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z$ de cada ponto avaliado a ser monitorado.

A umidade relativa do ar, a pressão atmosférica e a temperatura causam os chamados erros naturais nas operações que realizam medidas com os MED (medidor eletrônico de distância), pois afetam o índice de refração e modificam o comprimento de onda da energia eletromagnética (GHILANI e WOLF, 2012). No caso do trabalho em questão estes erros não foram considerados, uma vez que se trata de uma pré-análise e os dados não foram medidos efetivamente em campo, e sim simulados.

3.4 VISUALIZAÇÃO DOS DADOS

Após a criação do *plugin*, e sua utilização para o cálculo dos desvios-padrão das coordenadas dos pontos a serem monitorados (pontos-objeto), necessitou-se determinar uma forma de representação desses resultados, para avaliação do comportamento dos desvios-padrão calculados na estrutura. Para isso, utilizou-se o software gratuito *ParaView*.

O *plugin* criado fornece ao usuário uma tabela de atributos contendo informações como as coordenadas X, Y e Z dos pontos avaliados e as precisões dpx, dpy, dpz, dp3d, e dp2d, onde dpx é o desvio-padrão em X (σ_X), dpy é o desvio-padrão em Y (σ_Y), dpz é o desvio-padrão em Z (σ_Z) e dp3d e dp2d representam a resultante do precisão tridimensional, e da precisão bidimensional, respectivamente. Logo, os dados dessa tabela foram inseridos no programa *ParaView* para visualização 3D.

Esses dados são inseridos no software em forma de tabela, e são transformados para pontos utilizando o comando *Table To Point*, que permite a visualização desses dados em 3D. Com os pontos representados, é possível determinar qual das incógnitas se deseja visualizar (dpx, dpy, dpz, dp3d e dp2d) e, dessa forma, consegue-se distinguir como é o comportamento de cada uma dessas componentes representadas nos pontos que formam a estrutura a ser monitorada. Assim é possível a representação tridimensional dos pontos-objeto da estrutura avaliada, e nela pode-se visualizar em escalas de cores a variação dos valores do desvio-padrão em cada componente avaliada, ou seja, dpx, dpy, dpz, dp3d ou dp2d.

3.5 CENÁRIOS DOS TESTES APLICADOS

A fim de avaliar diferentes cenários, definiram-se diferentes configurações possíveis de instalação da estação total para o monitoramento da estrutura, e também diferentes posições para instalação dos pontos que serão utilizados para orientação da estação.

Determinaram-se quatro cenários diferentes, sendo estes apresentados na FIGURA 10, FIGURA 11, FIGURA 12, e FIGURA 13. Nas figuras são apresentados os pontos EST 01, EST 02, EST 03 e EST 04. Estes pontos correspondem às possíveis posições de instalação da estação total, cada uma para um respectivo teste (simulação). Já os pontos A, B e C correspondem às posições dos possíveis pontos de apoio para a orientação da estação total.

A TABELA 1, TABELA 2, TABELA 3 e TABELA 4, apresentam respectivamente as coordenadas em um referencial local, dos pontos avaliados em cada cenário. O eixo Z no referencial local é ortogonal aos eixos X e Y formando um sistema dextrogiro (deste modo, não é apresentado nas figuras a baixo).

FIGURA 10 - CENÁRIO 1



FONTE: A AUTORA (2019)

TABELA 1 - COORDENADAS EM UM SISTEMA DE REFERÊNCIA LOCAL DOS PONTOS DA ESTAÇÃO LIVRE E DOS PONTOS DE APOIO DO CENÁRIO 1

CENÁRIO 1	X (m)	Y (m)	* Z (m)
COORD_EST LIVRE	529586,235	7339063,090	588,428
APOIO_A	529584,881	7338470,176	654,372
APOIO_B	529193,342	7339216,889	570,000
APOIO_C	529644,457	7339163,633	605,000

FONTE: A AUTORA (2019)

FIGURA 11 - CENÁRIO 2



FONTE: A AUTORA (2019)

TABELA 2 – COORDENADAS EM UM SISTEMA DE REFERÊNCIA LOCAL DOS PONTOS DA ESTAÇÃO LIVRE E DOS PONTOS DE APOIO DO CENÁRIO 2

CENÁRIO 2	X (m)	Y (m)	Z (m)
COORD_EST LIVRE	529424,677	7338902,514	573,000
APOIO_A	529586,235	7339063,089	588,428
APOIO_B	529193,341	7339216,889	570,000
APOIO_C	529584,881	7338470,176	654,372

FONTE: A AUTORA (2019)

FIGURA 12 - CENÁRIO 3



FONTE: A AUTORA (2019)

TABELA 3 – COORDENADAS EM UM SISTEMA DE REFERÊNCIA LOCAL DOS PONTOS DA ESTAÇÃO LIVRE E DOS PONTOS DE APOIO DO CENÁRIO 3

CENÁRIO 3	X (m)	Y (m)	Z (m)
COORD_EST LIVRE	529193,342	7339216,890	570,000
APOIO_A	529584,881	7338470,176	654,372
APOIO_B	529586,235	7339063,090	588,428
APOIO_C	529644,457	7339163,633	605,000

FONTE: A AUTORA (2019)

No caso do cenário quatro (FIGURA 13) tem-se os pontos C1, C2, C3, C4 e C5, que foram planejados visando a orientação da estação total, desta forma foram simuladas diferentes posições para o ponto de orientação C. Logo, neste último teste a posição da estação total (procedimento de estação livre) foi simulada numa primeira etapa orientando a estação com os pontos A, B e C1, depois A, B e C2, e assim sucessivamente a fim de testar várias geometrias.

FIGURA 13 - CENÁRIO 4



FONTE: A AUTORA, 2019

TABELA 4 – COORDENADAS EM UM SISTEMA DE REFERÊNCIA LOCAL DOS PONTOS DA ESTAÇÃO LIVRE E DOS PONTOS DE APOIO DO CENÁRIO 4

CENÁRIO 4	X (m)	Y (m)	Z (m)
COORD_EST LIVRE	529586,235	7339063,090	588,428
APOIO_A	529584,881	7338470,176	654,372
APOIO_B	529424,677	7338902,515	573,000
APOIO_C1	529707,851	7338956,040	589,000
APOIO_C2	529679,425	7339011,578	589,000
APOIO_C3	529605,066	7339074,606	589,000
APOIO_C4	529567,198	7339097,134	589,000
APOIO_C5	529564,598	7339062,811	589,000

FONTE: A AUTORA, 2019

4 RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 *PLUGIN* PROPAGAÇÃO_ERRO

O *plugin* desenvolvido para o cálculo dos erros propagados apresenta na sua interface três janelas. Na primeira janela, com o nome de Orientacao_EstacaoLivre - FIGURA 14, o usuário deve entrar com as coordenadas dos três pontos que servirão de apoio para a orientação da estação total. Na segunda janela (Estacao_Livre) - FIGURA 15, o usuário deve inserir as coordenadas de instalação da estação total, assim como a precisão nominal do equipamento utilizado. E na terceira janela, que se chama Pontos_monitorados - FIGURA 16, deve-se inserir o arquivo no formato *shapefile*, contendo os pontos que representam a estrutura que se deseja monitorar e o número de séries que se deseja executar em campo para o levantamento desses pontos.

FIGURA 14 - PRIMEIRA JANELA DO *PLUGIN* PROPAGACAO_ERRO

PROPAGACAO_ERRO

Orientacao_EstacaoLivre Estacao_Livre Pontos_Monitorados

Entre com a coordenada 3D dos pontos de apoio para a orientação da estação:

Ponto A:
 Coordenada X: m Coordenada Y: m Coordenada Z: m

Ponto B:
 Coordenada X: m Coordenada Y: m Coordenada Z: m

Ponto C:
 Coordenada X: m Coordenada Y: m Coordenada Z: m

Cancel OK

FONTE: A AUTORA (2019)

FIGURA 15 - SEGUNDA JANELA DO *PLUGIN* PROPAGACAO_ERRO

PROPAGACAO_ERRO

Orientacao_EstacaoLivre Estacao_Livre Pontos_Monitorados

Entre com as coordenadas da Estação Livre :

Coordenada X: m Coordenada Y: m Coordenada Z: m

Entre com a precisão nominal do equipamento:

Precisão Linear: mm + ppm

Precisão Angular: Segundos

FONTE: A AUTORA (2019)

FIGURA 16 - TERCEIRA JANELA DO *PLUGIN* PROPAGACAO_ERRO

PROPAGACAO_ERRO

Orientacao_EstacaoLivre Estacao_Livre Pontos_Monitorados

Selecione o layer com os pontos a serem monitorados:

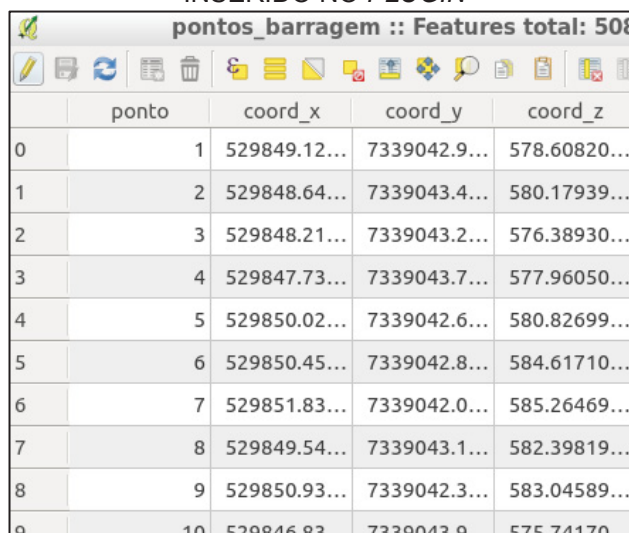
...

Número de séries de leituras:

FONTE: A AUTORA (2019)

Para o arquivo *shapefile* que será inserido nesse *plugin*, é necessário que a tabela de atributo desses pontos apresente as coordenadas de todos os pontos que se deseja monitorar. Por exemplo, para os pontos da barragem foi inserido um arquivo *shapefile* contendo as colunas com as coordenadas X, Y e Z dos pontos. O nome da coluna com as coordenadas X deve ser *coord_x*, da coordenada Y *coord_y* e das coordenadas Z *coord_z*, conforme demonstrado na FIGURA 17.

FIGURA 17 - EXEMPLO DA TABELA DE ATRIBUTOS DO ARQUIVO *SHAPEFILE* QUE DEVE SER INSERIDO NO *PLUGIN*

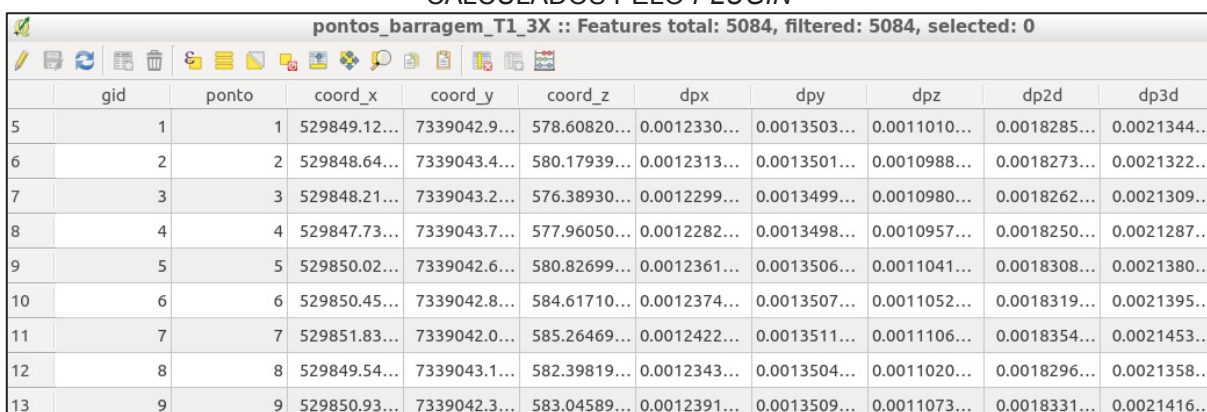


	ponto	coord_x	coord_y	coord_z
0	1	529849.12...	7339042.9...	578.60820...
1	2	529848.64...	7339043.4...	580.17939...
2	3	529848.21...	7339043.2...	576.38930...
3	4	529847.73...	7339043.7...	577.96050...
4	5	529850.02...	7339042.6...	580.82699...
5	6	529850.45...	7339042.8...	584.61710...
6	7	529851.83...	7339042.0...	585.26469...
7	8	529849.54...	7339043.1...	582.39819...
8	9	529850.93...	7339042.3...	583.04589...
9	10	529846.83...	7339043.9...	575.74170...

FONTE: A AUTORA (2019)

Após a inserção desses dados no *plugin*, este calcula: os desvios-padrão para as coordenadas X, representados pela sigla dpx - na tabela de atributos; os desvios-padrão para as coordenadas Y, representados por dpy na tabela de atributos; o desvio-padrão resultante calculado para as coordenadas X e Y, que na tabela de atributos estão representados pela sigla dp2d; os desvios-padrão para as coordenadas Z, representado pela sigla dpz; e a resultante tridimensional, representada na tabela de atributos pela sigla dp3d, como pode ser verificado na FIGURA 18.

FIGURA 18 - TABELA DE ATRIBUTOS DO ARQUIVO DE SAÍDA PARA OS PONTOS-OBJETO CALCULADOS PELO *PLUGIN*



	gid	ponto	coord_x	coord_y	coord_z	dpx	dpy	dpz	dp2d	dp3d
5	1	1	529849.12...	7339042.9...	578.60820...	0.0012330...	0.0013503...	0.0011010...	0.0018285...	0.0021344...
6	2	2	529848.64...	7339043.4...	580.17939...	0.0012313...	0.0013501...	0.0010988...	0.0018273...	0.0021322...
7	3	3	529848.21...	7339043.2...	576.38930...	0.0012299...	0.0013499...	0.0010980...	0.0018262...	0.0021309...
8	4	4	529847.73...	7339043.7...	577.96050...	0.0012282...	0.0013498...	0.0010957...	0.0018250...	0.0021287...
9	5	5	529850.02...	7339042.6...	580.82699...	0.0012361...	0.0013506...	0.0011041...	0.0018308...	0.0021380...
10	6	6	529850.45...	7339042.8...	584.61710...	0.0012374...	0.0013507...	0.0011052...	0.0018319...	0.0021395...
11	7	7	529851.83...	7339042.0...	585.26469...	0.0012422...	0.0013511...	0.0011106...	0.0018354...	0.0021453...
12	8	8	529849.54...	7339043.1...	582.39819...	0.0012343...	0.0013504...	0.0011020...	0.0018296...	0.0021358...
13	9	9	529850.93...	7339042.3...	583.04589...	0.0012391...	0.0013509...	0.0011073...	0.0018331...	0.0021416...

FONTE: A AUTORA (2019)

Uma das vantagens da aplicação deste *plugin* dentro do software QGIS é a possibilidade de visualização das posições dos pontos de apoio, e da posição da

estação total em relação aos pontos-objeto avaliados, apesar deste software não ser o mais adequado para uso em análises tridimensionais.

4.2 AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DOS PONTOS OCUPADOS PELA ESTAÇÃO TOTAL NOS DIFERENTES CENÁRIOS

Para os testes aplicados, avaliou-se primeiramente os valores obtidos para a precisão das coordenadas dos pontos ocupados pela estação total. Estas precisões, foram calculadas considerando três pontos de apoio para orientação da estação total (método da estação livre) em cada um dos cenários. Os valores calculados dos desvios-padrão para cada teste podem ser observados na TABELA 5, onde tem-se que dpx corresponde aos valores do desvio-padrão calculados para a coordenada X da estação, dpy para a coordenada Y e dpz para a coordenada Z. A sigla dp3d corresponde ao valor da resultante do desvio-padrão calculado para as três componentes (X, Y e Z) e dp2d a resultante para as componentes X e Y.

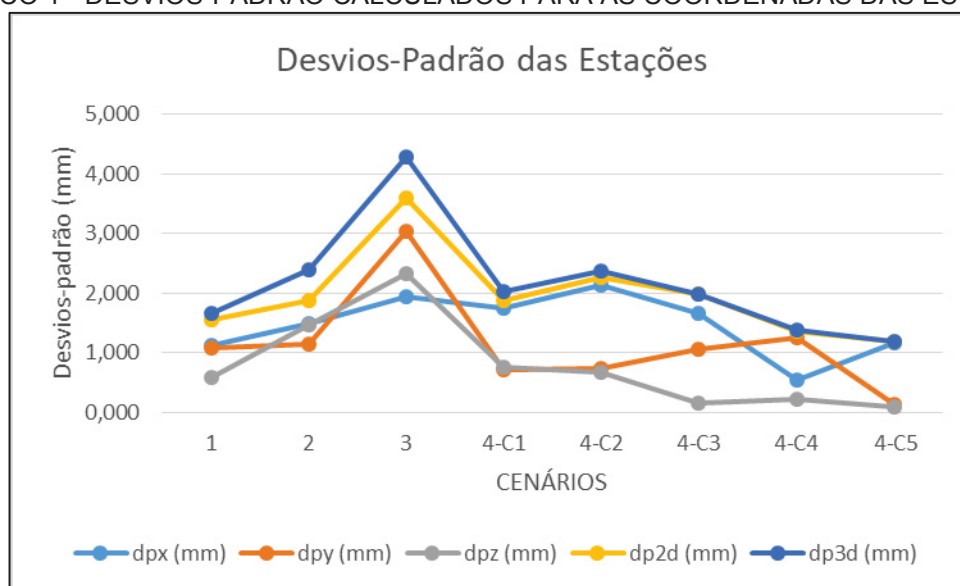
TABELA 5 - VALORES DOS DESVIOS-PADRÃO ESTIMADOS PARA AS ESTAÇÕES

CENÁRIO	dpx (mm)	dpy (mm)	dpz (mm)	dp2d (mm)	dp3d (mm)
1	1,1	1,1	0,6	1,5	1,7
2	1,5	1,2	1,5	1,9	2,4
3	1,9	3,0	2,3	3,6	4,3
4-C1	1,7	0,7	0,8	1,9	2,0
4-C2	2,1	0,7	0,7	2,3	2,4
4-C3	1,7	1,1	0,2	2,0	2,0
4-C4	0,5	1,2	0,2	1,4	1,4
4-C5	1,2	0,1	0,1	1,2	1,2

Fonte: A AUTORA (2019)

Com o objetivo de comparar as precisões obtidas para cada posição de instalação da estação total, plotou-se um gráfico contendo as precisões em X, Y e Z de cada ponto avaliado. Também se representou a resultante tridimensional dos pontos, representada no gráfico pela sigla dp3d.

GRÁFICO 1 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS PARA AS COORDENADAS DAS ESTAÇÕES



FONTE: A AUTORA (2019)

Ao analisar o GRÁFICO 1, observa-se que a estação do teste 3 apresentou os maiores valores dos desvios-padrão calculados. Isso permite inferir que a geometria aplicada neste teste resultou em maiores valores dos desvios-padrão se comparadas às outras geometrias avaliadas. O valor da resultante tridimensional para este teste é cerca de 4,3 mm, sendo maior se comparada à estação 1 (1,65 mm), à estação 2 (2,39 mm) e à estação 4.

No cenário 4, avaliou-se diferentes posições para instalação do ponto de apoio C, sendo estas posições representadas pelas letras C1, C2, C3 e C4 (FIGURA 19). Decidiu-se avaliar este teste dessa forma, levando em consideração que a região de instalação desses pontos é considerada estável e propícia para a instalação de pontos de controle para o caso de um levantamento pelo método de estação livre, o qual está sendo avaliado.

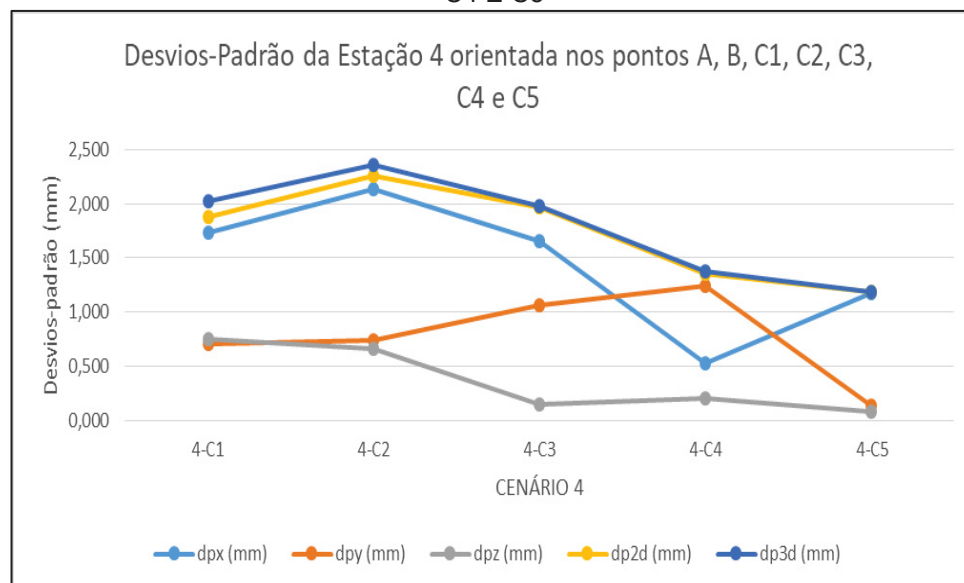
Pode-se, então, avaliar a precisão para o ponto da estação 4, levando em conta esses diferentes pontos de orientação. No GRÁFICO 2, pode-se verificar como ocorreu a variação apenas desses pontos avaliados nesse teste.

FIGURA 19 - ESTAÇÃO ORIENTADA NOS PONTOS C1, C2, C3, C4 E C5



FONTE: A AUTORA (2019)

GRÁFICO 2 - DESVIOS-PADRÃO DA ESTAÇÃO 4 ORIENTADA NOS PONTOS A, B, C1, C2, C3, C4 E C5



FONTE: A AUTORA (2019)

No GRÁFICO 2, observa-se que os menores valores dos desvios-padrão encontrados foram para a configuração em que se orientou a estação com o ponto C5, sendo este o mais próximo da estação total (aproximadamente 21,6 metros de distância). A geometria que apresentou um maior valor para a resultante do desvio-padrão calculado foi a que utilizou o ponto C2 na orientação, sendo este localizado a aproximadamente 106,5 metros de distância da estação 04. O ponto C1 está distante

aproximadamente 162 metros da estação 4, sendo este o mais distante da estação se comparado aos pontos C1, C2, C3 e C4. No entanto, ele não apresenta os maiores valores do desvio-padrão calculado. Isso permite inferir que não necessariamente o ponto mais próximo da estação permitirá uma melhor precisão para a orientação da estação. Sendo assim, os valores encontrados para a precisão neste teste aplicado dependem também da geometria e, conseqüentemente, da localização de todos os pontos de apoio utilizados na orientação da estação.

4.3 AVALIAÇÃO DA PRECISÃO CALCULADA PARA OS PONTOS-OBJETO A PARTIR DAS DIFERENTES POSIÇÕES DA ESTAÇÃO

Realizou-se a simulação da propagação de erros a partir de três posições de instalação da estação total. Essas posições podem ser visualizadas na FIGURA 20. Observa-se que a estação 01 foi orientada a partir do cenário apresentado no teste 1, a estação 02 no cenário apresentado no teste 02 e a estação 03 com o cenário apresentado no teste 03. A estação 4 está localizada na mesma posição que a estação 1, mudando apenas a localização dos pontos utilizados para a orientação da estação.

FIGURA 20 - POSIÇÕES DE INSTALAÇÃO DA ESTAÇÃO TOTAL



FONTE: A AUTORA (2019)

4.3.1 Testes aplicados para o cenário 1

No primeiro teste foram inseridos no *plugin* os pontos da nuvem de pontos gerada a partir do modelo 3D da barragem (FIGURA 8), e calculou-se o desvio-padrão desses pontos com base na precisão nominal da estação total TS15 considerando uma precisão linear de $2\text{mm} + 2\text{ppm}$, e uma precisão angular de $1''$. Calculou-se considerando que, no levantamento, foram realizadas uma (1X), três (3X) e oito (8X) séries de leituras, respectivamente. Estas quantidades foram definidas para verificar a evolução da melhora da precisão com o aumento do número de séries de leitura. Uma série de leitura pois é o mínimo que se realiza em um levantamento, três séries pois quando há divergências entre duas séries realiza-se uma terceira para fins de confirmação, e oito séries de leituras pois espera-se que com essa quantidade de repetições obtenha-se uma melhora mais significativa em termos de precisão, em relação às demais quantidades de séries de leituras executadas. No GRÁFICO 3 pode-se verificar a diferença entre os valores do desvio-padrão resultante entre essas séries de leituras.

GRÁFICO 3 – DP3D CÁLCULADOS PARA 1,3 E 8 SÉRIES DE LEITURAS - CENÁRIO 1



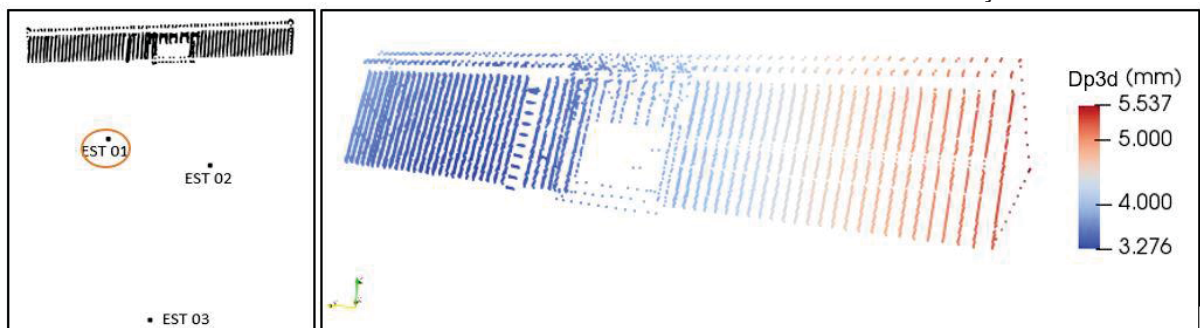
FONTE: A AUTORA (2019)

No GRÁFICO 3 é possível observar que quanto maior o número de leituras melhor é a precisão obtida para os pontos-objeto. No caso da realização de uma série de leituras, o desvio-padrão médio calculado foi de 3,9 mm, a precisão média para três séries de leituras foi de 2,3 mm e para as oito séries de leituras foi de 1,4 mm. Ou

seja, a precisão melhorou cerca de 2,5 mm quando comparados os testes com 1 série e 8 séries de leituras.

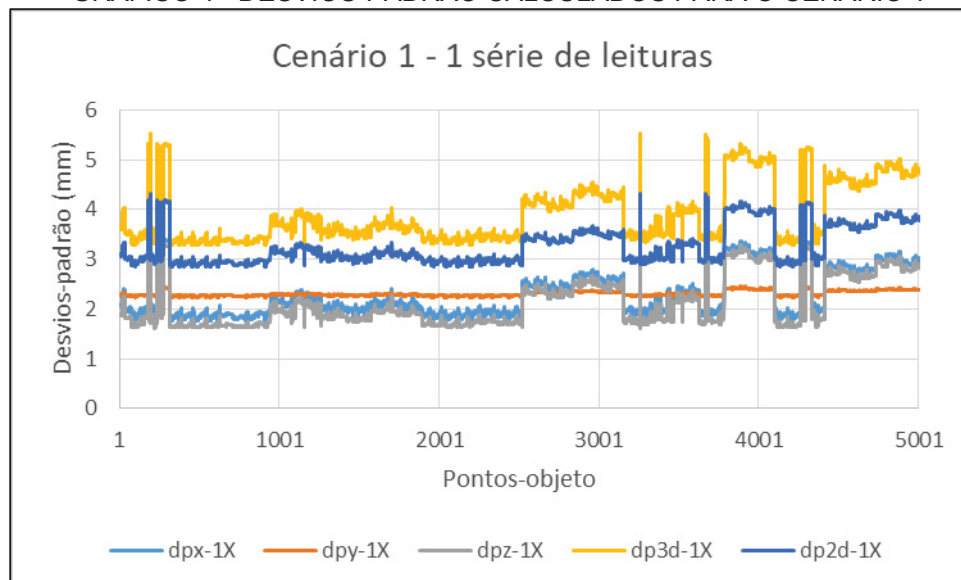
Os resultados para os valores dos desvios-padrão calculados para cada componente (X, Y e Z), para a resultante tridimensional calculada, e para a resultante das coordenadas X e Y (dp2d), para o caso do cenário 1 com 1 série de leituras, pode ser verificado no GRÁFICO 4, e os valores da resultante tridimensional para o mesmo caso, podem ser verificados na FIGURA 21. A estação 01 está localizada a aproximadamente 220 metros da barragem.

FIGURA 21 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS A PARTIR DA ESTAÇÃO 01



FONTE: A AUTORA (2019)

GRÁFICO 4 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS PARA O CENÁRIO 1

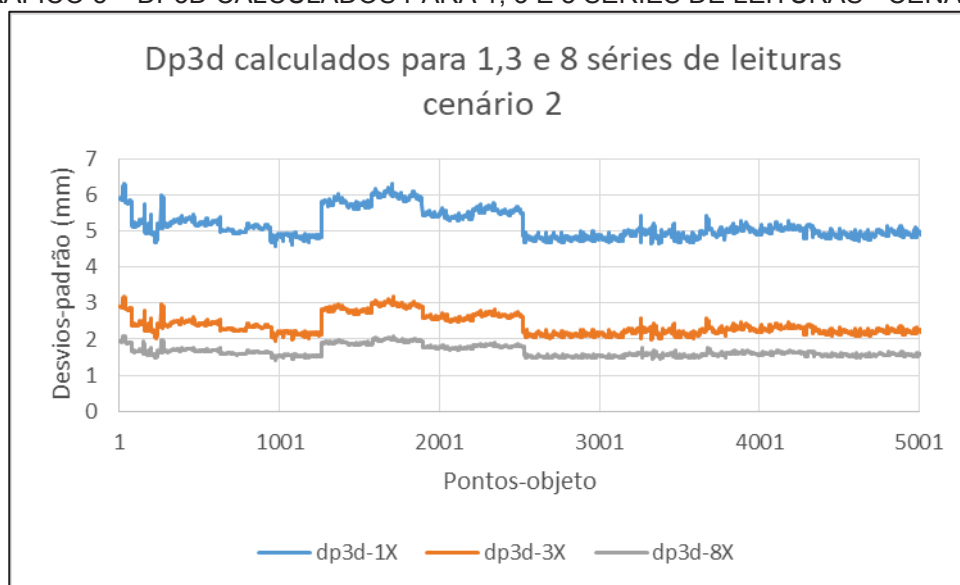


FONTE: A AUTORA (2019)

4.3.2 Testes aplicados para o cenário 2

No segundo cenário avaliado, assim como no primeiro, calculou-se o desvio-padrão dos pontos da nuvem de pontos da barragem, com base na precisão nominal da estação total TS15 considerando uma precisão linear de $2\text{mm} + 2\text{ppm}$, e uma precisão angular de $1''$. Calculou-se considerando que, no levantamento, foram realizadas uma (1X), três (3X) e oito (8X) séries de leituras, respectivamente. No GRÁFICO 5 pode-se verificar a diferença entre os valores do desvio-padrão resultante entre essas séries de leituras.

GRÁFICO 5 – DP3D CALCULADOS PARA 1, 3 E 8 SÉRIES DE LEITURAS - CENÁRIO 2

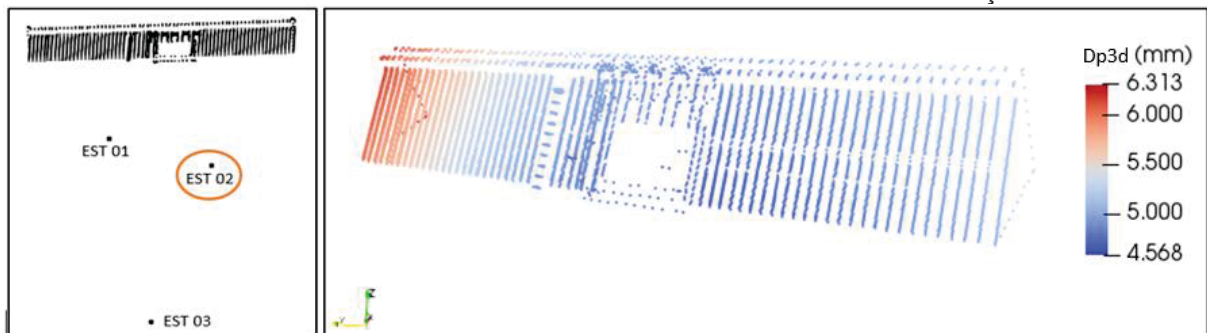


FONTE: A AUTORA (2019)

No GRÁFICO 5 é possível observar que, como esperado, os maiores valores dos desvios-padrão ocorreram quando se realizou apenas uma série de leituras. Os desvios-padrão calculados para esta série de leituras são de aproximadamente 5,2 mm, enquanto que os valores calculados para três séries de leituras são de 2,4 mm, e para oito séries de leituras são de 1,7 mm.

Os resultados para o desvio-padrão resultante em cada ponto-objeto, considerando o teste com 1 série de leituras, podem ser verificados na FIGURA 22. A estação 02 está localizada a aproximadamente 260 metros da barragem, e um pouco mais a direita, se comparada à posição da estação 1.

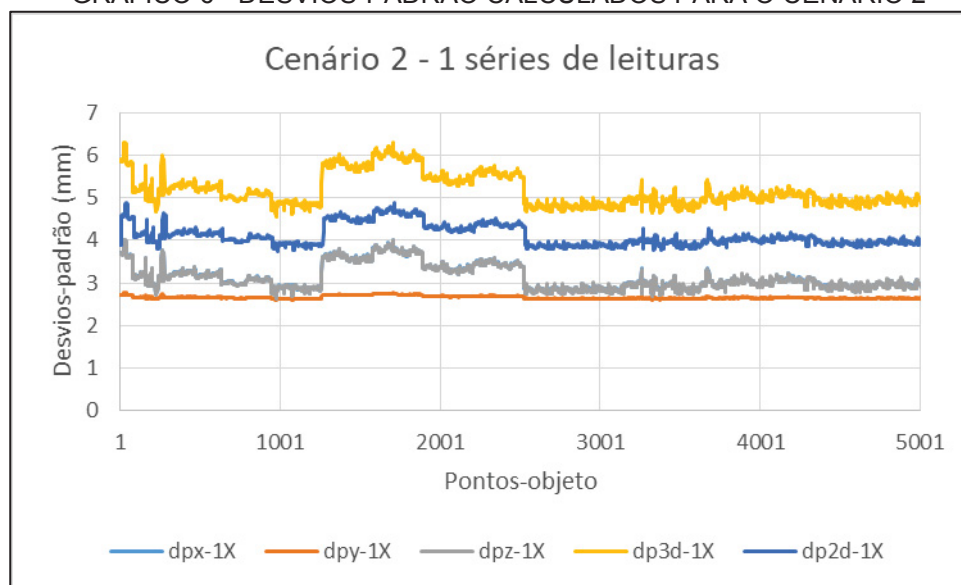
FIGURA 22 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS A PARTIR DA ESTAÇÃO 02



FONTE: A AUTORA (2019)

No GRÁFICO 6 têm-se os valores dos desvios-padrão calculados para as componentes X, Y e Z, e o valor da resultante calculada para as três componentes. Observa-se que, assim como no cenário 1, os valores dos desvios calculados para a componente Y sofrem menos variação entre os diferentes pontos-objeto do que os valores nas componentes X e Z. Além disso, tem-se que os menores valores calculados são para esta componente.

GRÁFICO 6 - DESVIOS-PADRÃO CÁLCULADOS PARA O CENÁRIO 2

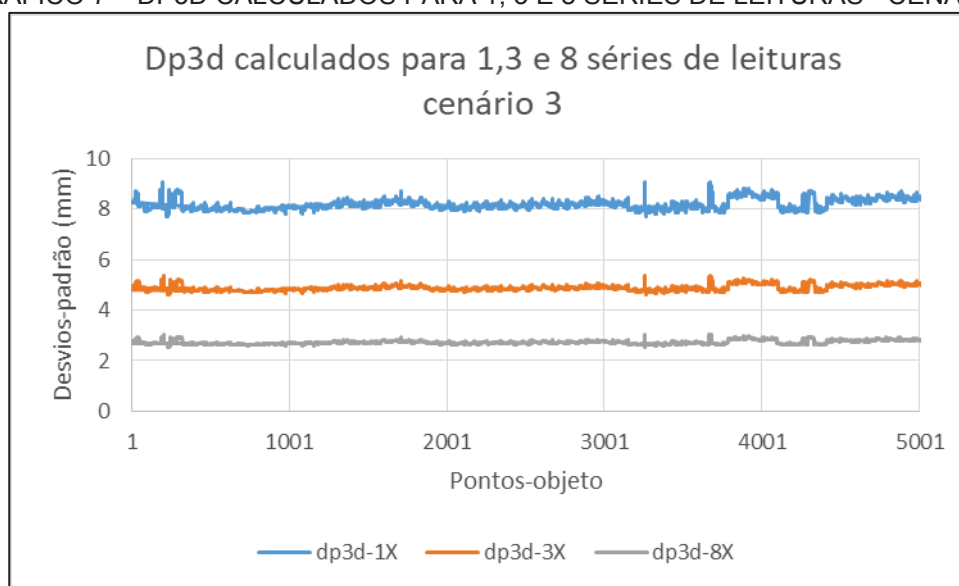


FONTE: A AUTORA (2019)

4.3.3 Testes aplicados para o cenário 3

Para o terceiro cenário, utilizou-se as mesmas precisões nominais e os mesmos números de séries de leituras que nos cenários anteriores. No GRÁFICO 7 pode-se verificar a diferença entre os valores do desvio-padrão entre as séries de leituras.

GRÁFICO 7 – DP3D CALCULADOS PARA 1, 3 E 8 SÉRIES DE LEITURAS - CENÁRIO 3



FONTE: A AUTORA (2019)

No GRÁFICO 7 é possível observar que os valores encontrados dos desvios-padrão médios apresentam menor variação do que os desvios-padrão apresentados nos cenários 1 e 2. A média dos valores calculados para uma série de leituras é de 8,2 mm, para três séries de leituras é de 4,9 mm e para oito séries de leituras é de 2,7 mm. A posição da estação total 3 em questão está aproximadamente a 605 metros de distância dos pontos-objeto avaliados. Por isso, se comparado aos testes 1 e 2, observa-se que neste teste foram obtidos os maiores valores dos desvios-padrão médio, como pode ser visualizado na FIGURA 23.

FIGURA 23 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS A PARTIR DA ESTAÇÃO 03

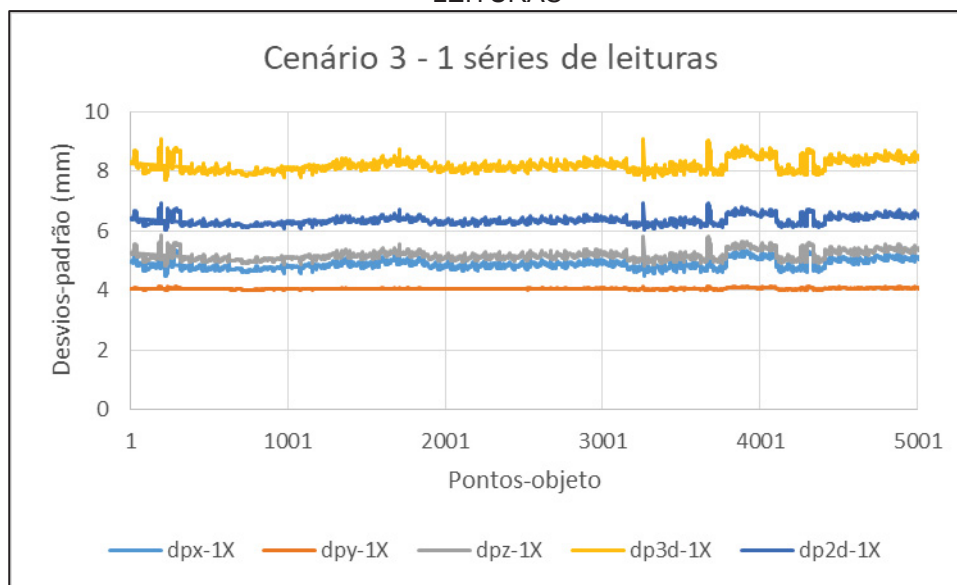


FONTE: A AUTORA (2019)

No GRÁFICO 8 tem-se os valores dos desvios-padrão calculados para as componentes X, Y e Z, para uma série de leituras, e o valor da resultante para as três componentes considerando o cenário 3. Observa-se que, assim como no cenário 1 e 2, os valores dos desvios-padrão calculados para a componente Y sofrem menos

variação do que os valores nas componentes X e Z. Além disso, tem-se que os menores valores calculados são para esta componente.

GRÁFICO 8 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS PARA O CENÁRIO 3 COM UMA SÉRIE DE LEITURAS

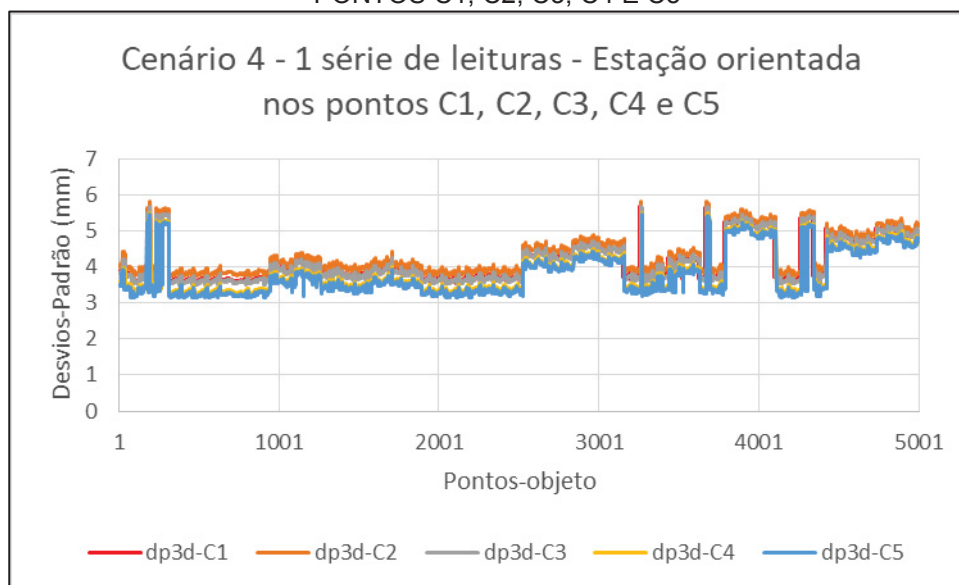


FONTE: A AUTORA (2019)

4.3.4 Testes aplicados para o cenário 4

No cenário 4, a posição da estação total avaliada é a mesma posição do que a avaliada no cenário 01, sendo esta a mais próxima da barragem (220 m). Neste cenário foram avaliados os valores dos desvios-padrão calculados a partir de cinco posições diferentes para o ponto C (FIGURA 19). No GRÁFICO 9, pode-se visualizar os valores dos desvios-padrão calculados para os casos em que a estação foi orientada nos pontos A, B e C (C1, C2, C3, C4 e C5), sucessivamente.

GRÁFICO 9 - CENÁRIO 4, COM UMA SÉRIE DE LEITURAS E A ESTAÇÃO ORIENTADA NOS PONTOS C1, C2, C3, C4 E C5



FONTE: A AUTORA (2019)

No GRÁFICO 9 é possível observar que os menores valores dos desvios-padrão ocorrem quando a orientação da estação total foi feita considerando o ponto C5, sendo este o mais próximo da estação 01. A FIGURA 24 ilustra os desvios-padrão obtidos neste cenário.

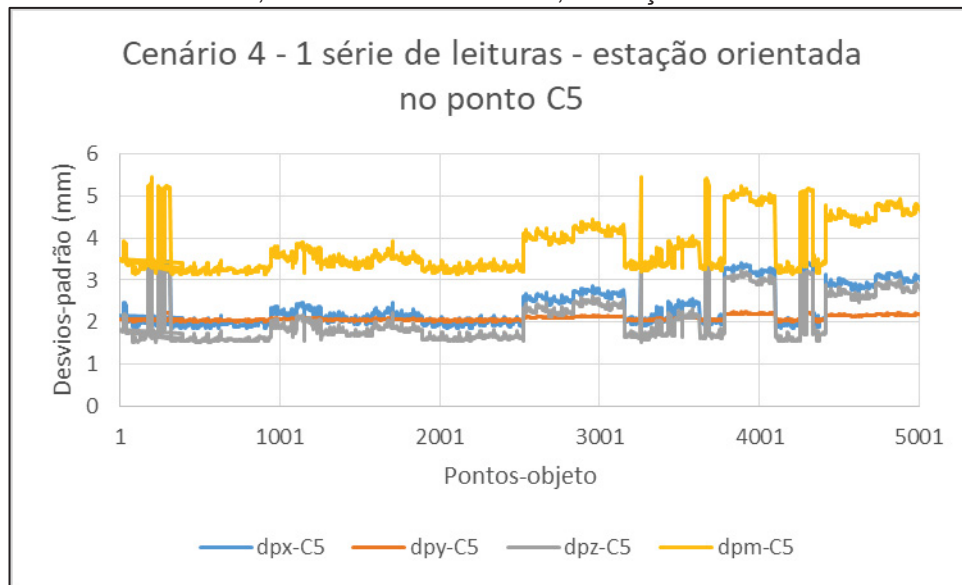
FIGURA 24 - DESVIOS-PADRÃO CALCULADOS A PARTIR DA ESTAÇÃO 01 PARA O CENÁRIO 4



FONTE: A AUTORA (2019)

No GRÁFICO 10 verificam-se os valores dos desvios-padrão calculados para cada componente (X, Y e Z), para o caso em que a estação total foi orientada utilizando os pontos A, B e C5, e realizou-se apenas uma série de leitura. Ao realizar uma comparação deste gráfico em relação aos aplicados nos outros cenários, observa-se que, assim como em todos os outros cenários aplicados, os valores do desvio-padrão calculados para a componente Y sofrem menos variação, sendo este valor de aproximadamente 2 mm.

GRÁFICO 10 - CENÁRIO 4, 1 SÉRIE DE LEITURAS, ESTAÇÃO ORIENTADA NO PONTO C5

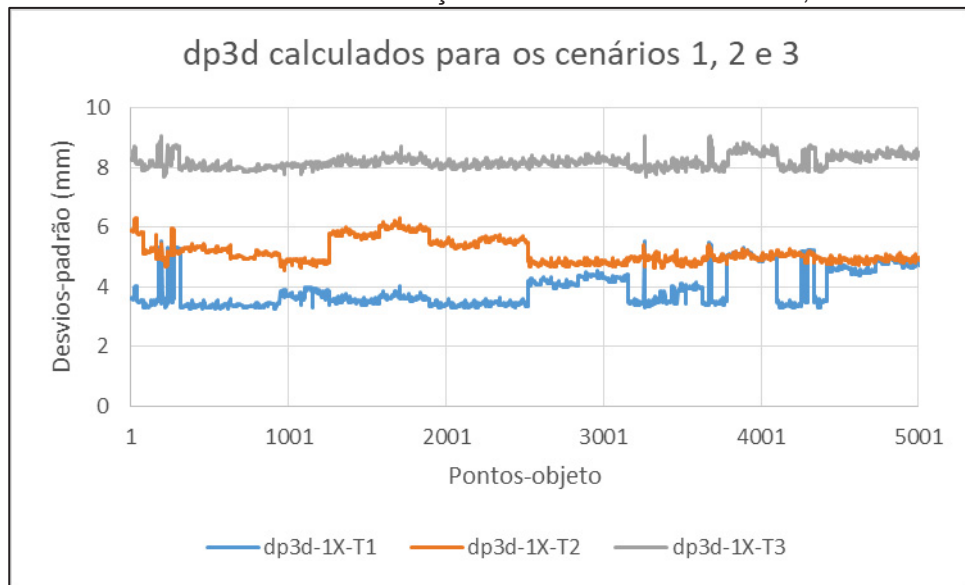


FONTE: A AUTORA (2019)

4.3.5 Comparação entre os diferentes cenários

O GRÁFICO 11 apresenta os valores dos desvios-padrão resultantes (dp3d) obtidos para os cenários 1, 2 e 3. Observa-se que os menores valores encontrados foram os valores do cenário 1, onde a estação total se encontra mais próxima ao objeto monitorado (220 m). Em seguida os valores calculados para o cenário 2, no qual a estação se encontra a aproximadamente 260 metros da barragem. Os maiores valores são os obtidos com o cenário 3, onde a estação está mais longe da barragem (605 m aproximadamente). Neste gráfico também é possível observar que as menores variações dos valores dos desvios-padrão estão no cenário 03, pois, apesar da estação estar localizada mais longe da barragem, é a estação que se encontra em uma posição mais centralizada em relação às outras.

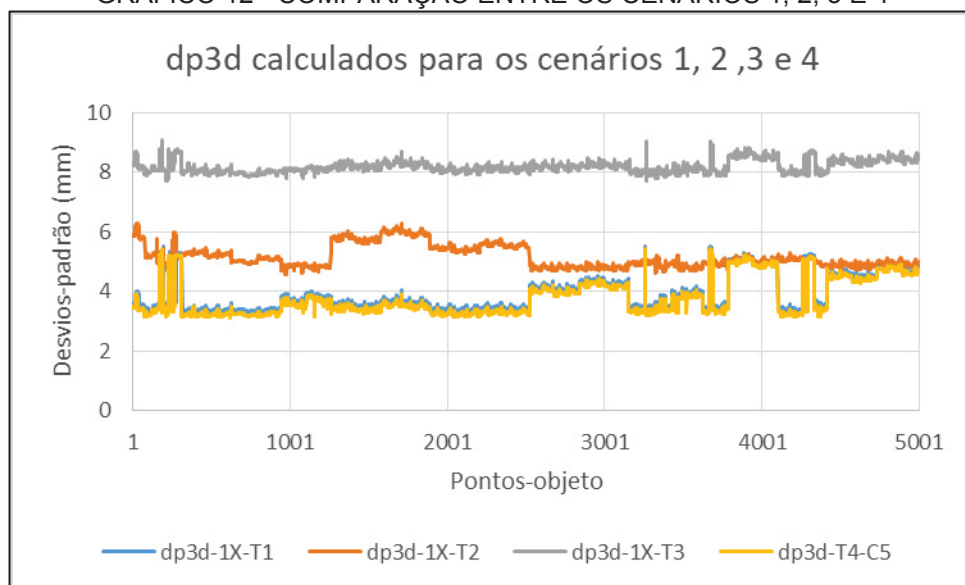
GRÁFICO 11 - COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS 1, 2 E 3



FONTE: A AUTORA (2019)

O GRÁFICO 12 apresenta os valores médios dos desvios-padrão resultantes (dp3d) para os cenários 1, 2 e 3, acrescentando também os valores calculados no cenário 4 (com orientação no ponto C5). Observa-se que os valores calculados do cenário 4 são muito próximos aos do cenário 1, uma vez que a posição de instalação da estação total é a mesma.

GRÁFICO 12 - COMPARAÇÃO ENTRE OS CENÁRIOS 1, 2, 3 E 4

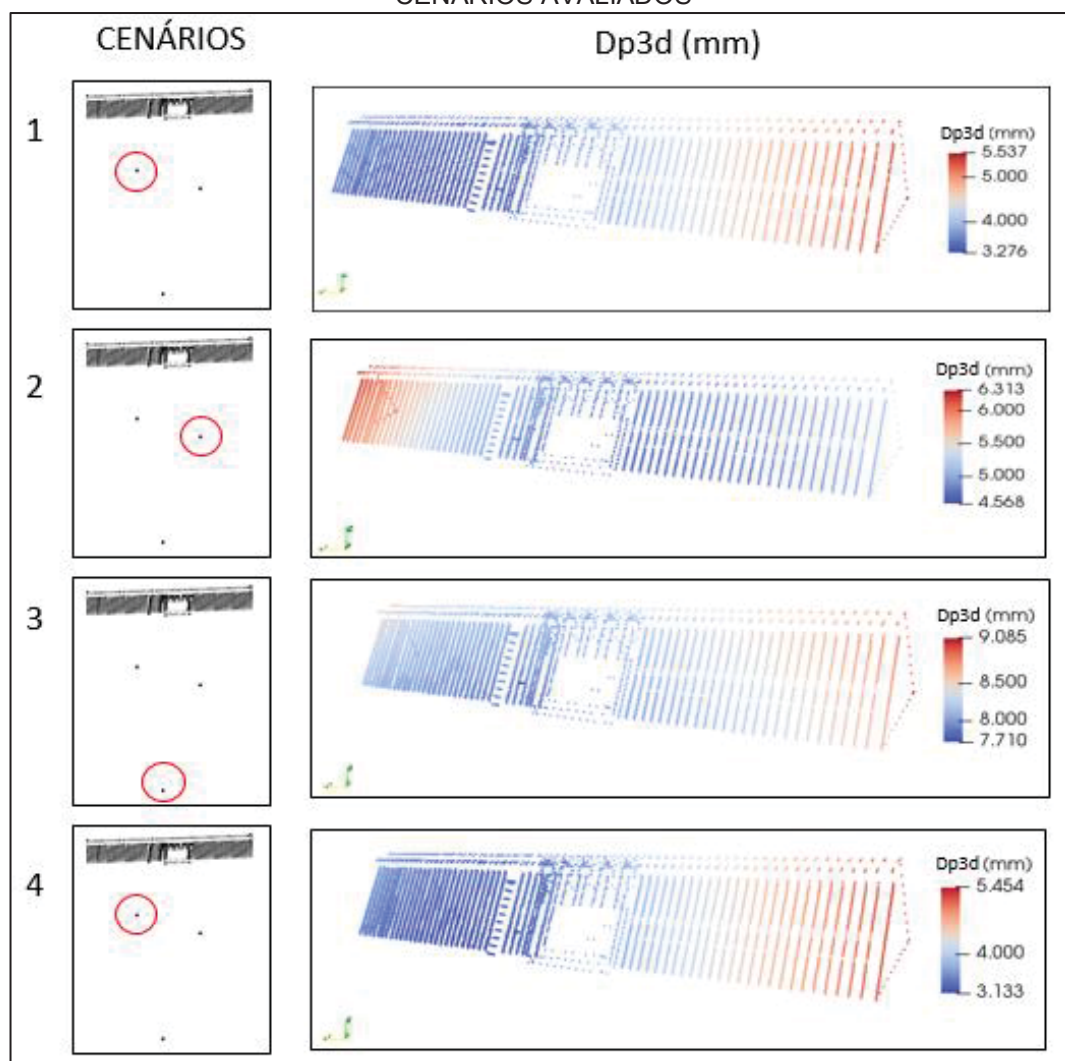


FONTE: A AUTORA (2019)

A FIGURA 25 sumariza os gráficos gerados para cada cenário avaliado. Observa-se que no caso do cenário 1, em que a posição da estação total está mais à

esquerda da estrutura avaliada, os maiores valores dos desvios-padrão calculados estão do lado direito da estrutura, ou seja, do lado mais distante da estação. No cenário 2 a estação está localizada mais à direita e, devido a isso, os pontos com maiores valores dos desvios-padrão estão à esquerda da estrutura. Para o caso do cenário 3, em que a estação está mais centralizada, observa-se que os maiores valores dos desvios-padrão estão nos pontos às bordas direita e esquerda na estrutura.

FIGURA 25 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DIFERENTES VALORES DOS DESVIOS-PADRÃO DOS CENÁRIOS AVALIADOS



FONTE: A AUTORA (2019)

4.3.6 Representação das elipses de erro

Como foram calculadas as precisões para aproximadamente 5000 pontos-objeto, decidiu-se utilizar as MVC's de apenas alguns desses pontos, sendo estes escolhidos de forma aleatória e presentes na parte superior da barragem, para calcular e representar algumas elipses de erro para os diferentes cenários avaliados.

Os valores encontrados para os parâmetros das elipses de erro dos pontos avaliados podem ser visualizados na TABELA 6, TABELA 7 e TABELA 8. Nessas tabelas podem ser observados os valores dos semieixos maiores (A) e menores (B) das elipses de erro, assim como os ângulos calculados.

Na TABELA 6 tem-se os valores calculados para as elipses de erro avaliados a partir do cenário 1, na TABELA 7 do cenário 2, e da TABELA 8 do cenário 3, todas considerando os valores calculados para uma série de leituras.

Nas figuras FIGURA 26, FIGURA 27, e FIGURA 28 tem-se a representação gráfica das elipses de erro calculadas para os cenários 1, 2 e 3 respectivamente. É importante ressaltar que essas elipses foram representadas de forma aumentada, para que fosse possível a sua visualização.

FIGURA 26 - ELIPSES DE ERRO - CENÁRIO 1



FONTE: A AUTORA (2019)

TABELA 6 - PARÂMETROS DAS ELIPSES DE ERRO CALCULADOS PARA O CENÁRIO 1

PONTOS- OBJETO	Parâmetros da elipse de erro		
	$\sigma_{\text{máx}}$ (mm) - A	σ_{min} (mm) - B	θ (°)
1	3,3	2,7	179,99
2	3,2	2,7	177,05
3	3,0	2,6	177,15
4	2,9	2,6	177,35
5	2,6	2,6	177,20
6	2,6	2,5	173,61
7	2,6	2,3	173,59
8	2,6	2,3	173,56
9	2,6	2,3	174,03
10	2,5	2,1	174,41
11	2,6	2,3	174,33
12	2,6	2,4	174,12
13	2,6	2,5	173,23

FONTE: A AUTORA (2019)

FIGURA 27 - ELIPSES DE ERRO - CENÁRIO 2



FONTE: A AUTORA (2019)

TABELA 7 - PARÂMETROS DAS ELIPSES DE ERRO CALCULADOS PARA O CENÁRIO 2

PONTOS- OBJETO	Parâmetros da elipse de erro		
	$\sigma_{\text{máx}}$ (mm) - A	σ_{min} (mm) - B	θ (°)
1	2,8	2,6	179,88
2	2,9	2,6	179,74
3	2,8	2,6	179,20
4	2,8	2,6	179,60
5	2,6	2,5	179,61
6	2,9	2,6	179,42
7	2,8	2,6	179,31
8	2,9	2,6	179,39
9	3,1	2,6	178,84
10	3,1	2,6	178,79
11	3,4	2,6	178,41
12	3,7	2,6	178,31
13	3,8	2,7	178,26

FONTE: A AUTORA (2019)

FIGURA 28 - ELIPSES DE ERRO - CENÁRIO 3



FONTE: A AUTORA (2019)

TABELA 8 - PARÂMETROS DAS ELIPSES DE ERRO CALCULADOS PARA O CENÁRIO 3

PONTOS- OBJETO	Parâmetros da elipse de erro		
	$\sigma_{\text{máx}}$ (mm) - A	σ_{min} (mm) - B	θ (°)
1	5,7	3,6	177,53
2	5,7	3,6	177,55
3	5,6	3,6	177,59
4	5,6	3,6	177,63
5	5,4	3,5	177,69
6	5,5	3,6	177,72
7	5,3	3,5	177,78
8	5,4	3,6	177,77
9	5,4	3,5	177,81
10	5,3	3,5	177,87
11	5,5	3,6	177,85
12	5,6	3,6	177,86
13	5,6	3,6	177,87

FONTE: A AUTORA (2019)

Na FIGURA 29 apresentam-se todas as elipses de erro calculadas para cada cenário (1, 2 e 3). As elipses em amarelo representam as calculadas para o cenário 1, as verdes para o cenário 2 e as azuis para o cenário 3. Observa-se que, para as elipses de erro calculadas no cenário 1, as maiores elipses representadas estão do lado mais afastado da posição da estação total avaliada, assim como no cenário 2. Já no cenário 3 tem-se que as elipses apresentam um formato bem uniforme e não apresentam uma variação visual significativa, sendo que estas elipses são as maiores se comparadas com as calculadas para os cenários 1 e 2.

FIGURA 29 - COMPARAÇÃO ENTRE AS ELIPSES DE ERRO DOS DIFERENTES CENÁRIOS



FONTE: A AUTORA (2019)

As elipses de erro permitem uma representação gráfica dos erros propagados e, dessa forma, essa representação se mostra importante pois permite avaliar como ocorre o comportamento dos erros propagados nos pontos-objetos apresentados. Neste contexto é possível detectar pontos problemáticos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seleção de pontos-objeto em uma estrutura para fins de monitoramento é uma atividade que depende do tipo da estrutura e da configuração do monitoramento geodésico, que engloba a disposição espacial dos pontos de referência, a posição e precisão do equipamento de medida e a geometria de observação. Neste trabalho apresentou-se um método que permite dar suporte à escolha da posição destes pontos com base na propagação de covariâncias, calculando as precisões esperadas na determinação das coordenadas do ponto na estrutura, com base em métodos de estação livre para o posicionamento do equipamento de medida, e irradiação tridimensional para o monitoramento dos pontos-objeto. Foi realizado um estudo de caso para a UHE de Mauá com diferentes cenários de observação. Os resultados apresentados em formas de gráficos e tabelas, permitiram definir regiões de observações sobre a barragem onde a propagação de erros para a coordenada dos pontos-objeto é menor, atingindo assim o principal objetivo deste trabalho.

Neste trabalho foram simulados 4 cenários, com diferentes possibilidades de configuração para o posicionamento dos pontos de referência para a orientação da estação total a partir do método de estação livre. O cenário 3 foi o que apresentou os maiores valores dos desvios-padrão para as coordenadas da estação livre, sendo este com a pior geometria avaliada. O cenário que apresentou os melhores valores calculados foi o cenário 4, com orientação nos pontos: A, B e C5. Devido a isso, foi possível avaliar a melhor posição de implantação dos pontos de controle que foram utilizados para orientar a estação total.

Observou-se que os pontos de apoio, para o cenário 3, não estavam bem distribuídos na área do entorno da posição da estação total. No entanto, os pontos-objeto medidos a partir da posição apresentada neste cenário, não apresentaram variações significativas dos valores dos desvios-padrão calculados, apesar de terem sido os maiores valores encontrados se comparado aos demais cenários. Se forem executadas várias séries de leituras para este caso, consegue-se atingir uma melhor precisão, o que torna viável a implantação de uma estação de apoio nesta posição para um projeto de monitoramento.

Com a metodologia empregada foi possível também quantificar os erros propagados em uma estrutura (no caso a UHE de Mauá), a partir da aplicação da propagação de erros utilizando o modelo matemático de irradiação tridimensional. A

criação de uma nuvem de pontos representando a estrutura avaliada permitiu modelar a barragem, e a partir desses pontos é possível calcular os valores dos erros propagados.

Para dar suporte aos cálculos matemáticos foi desenvolvido um *plugin* em linguagem de programação que permite o cálculo da propagação de erro para a nuvem de pontos que foi simulada para a UHE de Mauá. Esse *plugin* automatizou o processo dos cálculos de propagação de erros, e permitiu que fossem realizadas as simulações de forma interativa. Isso otimiza o planejamento do levantamento de campo.

Com os pontos-objeto representados em 3D, foi possível analisar as regiões em que foram apresentados os maiores e os menores valores dos desvios-padrão. Com isso, pode-se verificar qual a região mais propícia à implantação dos pontos-objeto, de forma que estes possam ser monitorados a partir de determinada posição da estação total, atingindo os menores valores dos erros propagados pela instrumentação e pelo método utilizado. Isso permitiu que fossem inferidas quais as melhores posições para a implantação de pontos-objeto na estrutura avaliada.

Como os valores calculados no *plugin* são apresentados nas tabelas de atributo, foi possível realizar as análises dos resultados obtidos para os erros propagados. A partir dessas tabelas, foi possível gerar gráficos, facilitando a análise dos valores obtidos.

Para a representação dos dados, no caso dos valores dos desvios-padrão para as coordenadas dos pontos-objeto, utilizou-se o software *ParaView*. Este permitiu representar de forma visual os valores calculados dos erros propagados na estrutura monitorada. O uso dessa ferramenta se mostrou importante para a visualização e compreensão dos resultados a partir da espacialização dos valores propagados sobre a estrutura.

Pode-se utilizar a metodologia aplicada para definir a posição de implantação de pontos-objeto para o monitoramento de estruturas de forma que a propagação de erros seja mínima (ou menor) para esses pontos. No entanto, é importante ressaltar que muitas vezes, dependendo da estrutura avaliada, as posições dos pontos-objeto devem ser realizadas em regiões previamente determinadas, uma vez que se sabe que nesta localização ocorre uma maior deformação da estrutura ou que nesta posição possa existir um ponto de interesse para um projeto. Portanto, nestes casos

cabe a simulação indicar, principalmente, o local onde pode ser instalada a estação total com o objetivo de diminuir a influência dos erros propagados nos pontos-objeto.

Outro fator importante para atividades de monitoramento e de levantamentos em geral, é considerar a precisão exigida pelo projeto. Então, apesar de saber que a partir do monitoramento com a estação total instalada na posição mais próxima da barragem tem-se menores valores de desvio-padrão, outras posições também podem ser consideradas para o monitoramento, se elas permitirem que sejam atingidas as precisões exigidas pelo cliente. Portanto, é importante ressaltar que são muitas as variáveis que devem ser consideradas para o planejamento de um levantamento. A pré-análise fornece várias soluções que atendem aos requisitos do cliente, cabe então verificar qual delas é a mais adequada.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros recomenda-se:

- Aplicar a lei de propagação das covariâncias para diferentes métodos de levantamento, como por exemplo nivelamento geométrico e posicionamento GNSS;
- Realizar investigações mais detalhadas sobre a influência da precisão angular;
- Realizar trabalhos de otimização e pré-análise de levantamentos que visem um planejamento em campo, no próprio local da área a ser levantada;
- Analisar e aplicar as correções devido à curvatura da Terra e da refração atmosférica na propagação de erros;
- Aplicar as correções ambientais e instrumentais;
- Avaliar os critérios de planejamento de levantamentos dependendo da finalidade do mesmo, como por exemplo para um levantamento plani-altimétrico cadastral;
- Implementar metodologia para determinação da estação livre considerando a precisão dos pontos de apoio;
- Adotar diferentes metodologias para a solução do método da Estação Livre, como por exemplo, a transformação isogonal de Helmert, como apresentado em Klein et al. (2017);
- Realizar uma investigação sobre quais fatores (direções ou distâncias) mais influenciam nos erros propagados na estrutura.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. L. F. G. et al. Metodologia de ensino para Topografia: Proposta didática para o método de estação livre. **Anais do IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife, p. 1-11, 2012.
- CHYZANOWSKI, A. A comparison of different approaches into the analyses of deformation measurements. **Proceedings of XVI International Congress of the Federation of Surveyors**, Montreux, August 9-18, 1981.
- CRUZ, W. **Integração de dados de monitoramento de estruturas antrópicas. Estudo de caso: UHE Mauá**. Tese de doutorado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- DALAZOANA, R. Introdução à Pré-análise. In: Camil Gemaël; Alvaro Muriel Lima Machado; Romualdo Wandresen. (Org.). **Introdução ao ajustamento de observações - aplicações geodésicas**. 2ed. Curitiba: Editora UFPR, p. 345-365, 2015.
- DEPARTMENT OF ARMY. – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. **Manual 1110-1- 1004 Deformation Monitoring and Control Surveying**. Washington, DC, 1994.
- EL-SHEIMY N., **Adjustment of Observations**. University of Calgary, 2000.
- ESPARTEL, L. **Curso de Topografia**. 9ª ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987.
- FAGGION, P. L.; NADAL, C. A.; VEIGA, L. A. K. **Relatório Técnico 01-2012 Projeto PD6491-0227/2011 - Monitoramento Geodésico - Projeto e Implantação da rede de Auscultação Geodésica da UHE Mauá**. Departamento de Geomática. Universidade Federal do Paraná, 2012.
- FAN, H. **Theory of errors and least squares adjustment**. Tekniska högskolan, 1997.
- GEMAEL C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN R., **Introdução ao Ajustamento de Observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 2015.
- GHILANI, C. D., WOLF P. R. **Elementary surveying: an introduction to geomatics**. 13ª ed., Nova Jersey, 2012.
- GHILANI, C. D. **Adjustment computations: spatial data analysis**. Ed. John Wiley & Sons, 2017.
- GIAA, Geomatics Industry Association of America, 2002. DIN 18723 Specification for Theodolite Accuracy. **Professional Surveyor Magazine**. 2002.
- GRAFAREND E. W. Optimization of Geodetic Networks, **Bolletino di Geodesia e Science Affini**, v. 33, n.4, p. 351-406, 1974.
- GONÇALVES, E. M. **Planejamento de rede de monitoramento voltada para o monitoramento de estruturas empregando-se LST (Laser Scanner Terrestre)**.

Dissertação de mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

KLEIN, I. **Proposta de um novo método para o planejamento de redes geodésicas**. Tese de doutorado, Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

KLEIN, I; GUZATTO, M. P.; HASENACK, M, CABRAL, C. R.; LIMA, A. P. B, FRIRSCH, S., JUNIOR, L. A.M.R.; MOMO, G. F. Rede de referência municipal para estações livres: uma proposta de baixo custo e grande abrangência. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 3, 2017.

KUANG, S. L. **Geodetic Network Analysis and Optimal Design**: concepts and application, Ann Arbor Press, Michigan, USA, 1996.

MARINI, M. C.; MONICO, J. F. G. Aspectos da otimização e processamento de redes GPS. **Pesquisas em Geociências**, v. 30, n. 2, p. 51-60, 2003.

MIRANDA, F. D.; VEIGA, L. A. K., Método de ressecção aplicado na determinação de coordenadas no monitoramento de pontos. **Anais do III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, p. 001-005, Recife, 2010.

OGUNDARE, J. O. **Precision Surveying**: The Principles and Geomatics Practice. John Wiley & Sons, 2015.

RAMOS, F. F.; RODRIGUES, D. D.; ANDRADE R. J. O. Avaliação da precisão de posicionamentos por interseção angular a ré. **II Simpósio Brasileiro de Geomática e V Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas**, ISSN 1981-6251, p. 263-268, Presidente Prudente, São Paulo, 2007.

SANTOS, M. C. dos. **Estabilidade das Estruturas Geodésicas**. Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1999.

SHULTS, R.; ROSHCHYN, O.; Preliminary Determination of Spatial Geodetic Monitoring Accuracy for Free Station Method. **Geodetski list**, v. 70, n. 4, p. 355-370, 2016.

SIGUEL, A. R. **Monitoramento da barragem da usina hidrelétrica Mauá utilizando irradiação tridimensional**, Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2013.

SILVA, I.; SEGANTINI, PCL. **Topografia para Engenharia** - Teoria e Prática de Geomática. Rio de Janeiro, 2015.

SUCI, F. M.; FAGGION, P. L. Análise da estabilidade da rede geodésica de monitoramento da UHE Salto Caxias a partir de dados GPS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, n. 4, 2012.

VANÍCEK. P.; KRAKIWSKY, E. J. **Geodesy: The Concepts**, 2. Ed. Amsterdam: North Holland/Elsevier, 1986.